



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Implementación del software estadístico Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad de aire de Bogotá**

**Pedro Alejandro García Ávila**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Maestría en Ingeniería Ambiental

Director:  
Néstor Y. Rojas Roa

Universidad Nacional de Colombia  
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá D.C. Colombia  
2013

## **Agradecimientos**

A mi esposa, mi hija y mi familia que siempre me apoyaron.

A Dios creador

Al Ingeniero Néstor Rojas por su valiosa colaboración y permanente ayuda.

## **Resumen**

El presente trabajo implementa la herramienta Openair con el propósito de buscar un mayor entendimiento de la localización y naturaleza de las fuentes de mayor impacto sobre los valores de las concentraciones de contaminantes del aire registrados en las estaciones de la Red De Monitoreo De la Calidad Del Aire De Bogotá (RMCAB). Se utilizó la información de la Secretaría De Ambiente De Bogotá, la cual comprendía el periodo entre los años 1997 y 2011, pero debido a que no se contaba con la información completa para utilizar el programa en estos años, fue necesario depurar la información y seleccionar el periodo que abarcaba los años 2009-2011. Para el estudio se seleccionaron estaciones: Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda, Tunal, Simón Bolívar, Ferias, Suba, Usaquén y Guaymaral.

Se encontró que los informes de la RMCAB realizan un análisis estadístico básico de variables meteorológicas y de contaminantes, lo que permite determinar el grado de cumplimiento de las normas de calidad del aire para Bogotá. El programa Openair permitió aprovechar en forma más adecuada la información de la RMCAB y mediante la aplicación de sus herramientas, en especial el gráfico polar, se pudo analizar las concentraciones de los contaminantes:  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ,  $NO_x$ , y  $NO_2$ , igualmente, con los resultados se propusieron fuentes de contaminación local y regional, entre las que se encuentran: la región de los municipios Funza-Mosquera, Sibaté, Cazucá y Usme, como fuentes regionales y la Zona Industrial de Bogotá y vías principales de Bogotá entre otras, como fuentes locales.

**Palabras clave:** contaminación del aire, red de monitoreo, análisis de datos, openair

## **Abstract**

In the present study, the Openair software package was used in order to improve the understanding of the location of the sources that have a greater impact on air pollutant concentration values recorded by Bogota's Air Quality Monitoring Network (RMCAB as per the acronym in Spanish). The original database covered the 1997-2011 period. However, only the 2009-2011 period was used due to data quality and completeness. The Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda, Tunal, Simón Bolívar, Ferias, Suba, Usaquén and Guaymaral stations were selected among the 13 existing ones. The RMCAB reports cover basic statistic analysis of meteorologic variables and pollutant concentrations, with the only purpose of determining attainment of air quality standards, but they do not address the relationship with the origin of pollutants. The use of Openair, and particularly its polar graph, allowed to estimate the location of local and regional pollution sources. Results show that regional sources are located in the municipalities of Funza-Mosquera, Sibaté, Cazucá and Usme, and local sources are in located in the industrial areas of Puente Aranda, Kennedy and Fontibón and along the city's main avenues.

**Keywords:** air pollution, monitoring network, data analysis, Openair



## Contenido

	pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>III</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de anexos.....</b>	<b>XI</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>1. Red de monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá.....</b>	<b>16</b>
1.1 Estaciones de monitoreo de Bogotá.....	16
1.2 Informes de la RMCAB.....	18
1.2.1 Información en línea .....	18
1.2.2 Informes especiales y periódicos.....	18
1.3 Fuentes de contaminación.....	19
1.3.1 Fuentes de contaminación regional.....	20
1.3.2 Fuentes locales de contaminación.....	22
1.4 Metodología empleada con Openair.....	22
1.4.1 Clasificación de las estaciones de monitoreo .....	24
1.4.2 Herramientas del programa Openair .....	25
1.4.2.1 Gráficas polares.....	27
<b>2. Metodología.....</b>	<b>31</b>
2.1 Primera fase: Contraste entre los análisis incluidos en los informes periódicos de la RMCAB y las posibilidades que ofrece la aplicación Openair.....	31
2.1.1 Etapa 1-1. Establecimiento de criterios de comparación entre los informes de la RMCAB y las herramientas que ofrece Openair.....	32

<i>Implementación del Software estadístico Openair</i> .....	VI
2.1.2 Etapa 1-2. Construcción de una matriz de comparación entre los informes de la RMCAB y las herramientas que ofrece Openair.....	32
2.1.3 Etapa 1-3. Identificación de herramientas de análisis de Openair que puede enriquecer el conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá.....	32
2.2 Segunda fase. Depuración de la información disponible de la RMCAB mediante un análisis primario.....	32
2.2.1 Etapa 2-1. Adecuación de la información de la RMCAB para su análisis con Openair.....	33
2.2.2 Etapa 2-2. Establecimiento de criterios para la depuración de la información de la RMCAB mediante un análisis primario.....	33
2.2.3 Etapa 2-3. Aplicación del análisis primario a la información de la RMCAB y depuración de la información.....	34
2.3 Tercera fase. Análisis de la información depurada y generación de conocimiento adicional sobre la calidad del aire en Bogotá mediante Openair.....	34
2.3.1 Etapa 3-1 Análisis de la información depurada con las diversas herramientas de Openair.....	35
2.3.2 Etapa 3-2 Evaluación del desempeño de Openair en la generación de nuevo conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá.....	35
2.3.2.1 Análisis relación de concentración sistema NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> – Ozono .....	35
2.3.2.2 Análisis de concentración de PM <sub>2.5</sub> .....	35
2.3.2.3 Análisis de la variación espacial de la concentración.....	36
<b>3. Resultados .....</b>	<b>38</b>
3.1 Primera fase Contraste entre los análisis incluidos en los informes periódicos de la RMCAB y las posibilidades que ofrece la aplicación Openair.....	38
3.2 Segunda fase. Depuración de la información disponible de la RMCAB mediante un análisis primario.....	40
3.2.1 Primer criterio: Selección de estaciones de la RMCAB y período histórico.....	42
3.2.2 Segundo Criterio: Análisis de los valores del porcentaje de captura para la concentración de los contaminantes para las 10 estaciones seleccionadas para el período 2008-2011.....	43
3.2.3. Tercer Criterio: Verificación de las recomendaciones de la Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA existentes en Colombia – GPVD (IDEAM, 2011).....	45

<i>Implementación del Software estadístico Openair</i> .....	VII
3.3 Tercera fase. Análisis de la información depurada y generación de conocimiento adicional sobre la calidad del aire en Bogotá mediante Openair.....	48
3.3.1 Rosas de vientos.....	48
3.3.2 Análisis de la concentración de PM <sub>10</sub> .....	52
3.3.3 Análisis de concentración SO <sub>2</sub> .....	57
3.3.4 Análisis de la concentración de ozono.....	61
3.3.5 Análisis de la concentración de NO <sub>x</sub> .....	66
3.3.6 Análisis de la concentración de NO <sub>2</sub> .....	69
3.4 Etapa 3-2 Evaluación del desempeño de Openair en la generación de nuevo conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá. ....	72
3.4.1 Análisis relación del sistema NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> – ozono.....	72
3.4.2 Análisis de la concentración de PM <sub>2.5</sub> .....	73
3.5 Análisis de la variación espacial de la concentración.....	76
<b>4. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>84</b>
4.1 Conclusiones.....	84
4.2 Recomendaciones.....	85
<b>Bibliografía.....</b>	<b>86</b>

## Lista de tablas

pág.

<b>Tabla 1-1:</b> Resumen de las características de las estaciones de la RMCAB.....	17
<b>Tabla 2-1:</b> Carga contaminante calculada para las 5 regiones de mayor contaminación de jurisdicción de la CAR.....	21
<b>Tabla 3-1:</b> Características de los contaminantes O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO y material particulado.....	23
<b>Tabla 4-1:</b> Clasificación de los ambientes de monitoreo propuestos .....	24
<b>Tabla 5-1:</b> Herramientas de Openair agrupadas por similitud en su utilidad.....	26
<b>Tabla 6-1:</b> Funciones de ayuda de Openair.....	26
<b>Tabla 7-3:</b> Criterios de comparación entre informes de la RMCAB y estudios realizados con Openair.....	39
<b>Tabla 8-3:</b> Instrucción de introducción de parámetros a evaluar en el programa.....	40
<b>Tabla 9-3:</b> Principales características de las 20 estaciones de la RDCAB a tener en cuenta para su aplicación en el programa Openair.....	42
<b>Tabla 10-3:</b> Porcentaje de captura para SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> y O <sub>3</sub> en las estaciones de la RMCAB para el período 2008-2011. Se resaltan en color verde las que tienen un valor mayor o igual al 75% .....	44
<b>Tabla 11-3:</b> Matriz de relación estaciones de la RMCAB- fuentes de contaminación y contaminantes.....	81

## Lista de Figuras

pág.

<b>Figura 1-1:</b> Imagen capturada del sistema de información en línea de la RMCAB.....	18
<b>Figura 2-1:</b> Ilustración esquemática de la formación y transporte de material particulado.....	20
<b>Figura 3-1:</b> Municipios cercanas a Bogota con mayores emisiones de contaminantes industriales .....	21
<b>Figura 4-1:</b> Sector industrial de las localidades de Kennedy,Fontibón y Puente Aranda donde se concentra la mayor carga contaminante generada en Bogotá por fuentes fijas que emplean carbón como combustible.....	22
<b>Figura 5-1</b> Fotografía de una estación de monitoreo tipo trafico .....	25
<b>Figura 6-1:</b> Ejemplo de gráfico <i>PolarPlot</i> correspondiente a la estación Marylebone Road (UK).....	27
<b>Figura 7-1:</b> Ejemplo de comparación de gráfico polar para los contaminantes PM10, CO, SO2, NOx. 28.....	28
<b>Figura 8-1:</b> Triangulación de 2 gráficas polar Plot para un problema de contaminación de una acería ubicada en el sitio Port Labor en el Reino Unido.....	29
<b>Figura 9-1:</b> Gráfico polar de estudio de la tendencia de ozono entre 2000 -2009 en la región Port Talbot.....	29
<b>Figura 10-2</b> Etapas de la primera fase .....	31
<b>Figura 11-2:</b> Etapas de la segunda fase.....	33
<b>Figura 12-2:</b> Etapas de la tercera fase.....	34
<b>Figura 13-3:</b> Gráfica Resumen de datos estación Puente Aranda período sept. 1999- dic. 2011.....	41
<b>Figura 14-3:</b> Comportamiento de la concentración de NOx,NO2 y NO en estaciones de la RMCAB .....	45
<b>Figura 15-3:</b> Comportamiento de la concentración de PM10 y PM2.5 estaciones de la RMCAB....	46

<i>Implementación del Software estadístico Openair.....</i>	<i>X</i>
<b>Figura 16-3:</b> Diagrama de correlación para NO <sub>x</sub> y O <sub>3</sub> estaciones RMCAB .....	46
<b>Figura 17-3:</b> Diagrama de correlación para CO y NO <sub>x</sub> estaciones RMCAB .....	47
<b>Figura 18-3:</b> Diagrama de correlación para SO <sub>2</sub> y PM <sub>10</sub> estaciones RMCAB .....	47
<b>Figura 19-3:</b> Rosa de los vientos para el período 2009-2011 estaciones RMCAB.....	49
<b>Figura 20a-3:</b> Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2009 y 2011 en la estación Puente Aranda.....	50
<b>Figura 20b-3:</b> Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2009 y 2011 en la estación Puente Aranda.....	51
<b>Figura 20c-3:</b> - Rosa de los vientos para periodos horarios entre 2009 y 2011 en la estación Puente Aranda .....	51
<b>Figura 21-3:</b> Gráfico polar de la concentración de PM <sub>10</sub> para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB.....	53
<b>Figura 22-3:</b> Gráfico polar de la concentración de PM <sub>10</sub> para periodos mensuales entre 2009 y 2011 de las estaciones de Carvajal, Kennedy, Fontibón Y Puente Aranda.....	54
<b>Figura 23-3:</b> Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de PM <sub>10</sub> por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB .....	56
<b>Figura 24-3:</b> Gráfico polar de la concentración de para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB.....	57
<b>Figura 25-3:</b> Gráfico polar de la concentración de SO <sub>2</sub> para periodos mensuales entre 2009 y 2011 de las estaciones Carvajal y Kennedy.....	59
<b>Figura 26-3:</b> Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de SO <sub>2</sub> por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB.....	60
<b>Figura 27-3:</b> Gráfico polar concentración de ozono para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB .....	61
<b>Figura 28-3:</b> Gráfico polar concentraciones ozono para periodos mensuales entre 2009 y 2011 estaciones Carvajal, Fontibón, Guaymaral y Suba .....	63
<b>Figura 29-3:</b> Gráfico Polar Anular para la variación de la concentración de ozono horaria de la concentración de ozono por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB...	65
<b>Figura 30-3:</b> Gráfico polar de la concentración de NO <sub>x</sub> para periodos anuales entre 2009 - 2011 estaciones de la RMCAB .....	66
<b>Figura 31-3:</b> Gráfica polar de la concentración NO <sub>x</sub> para periodos mensuales entre 2009 y 2011 estación Ferias.....	67

**Figura 32-3:** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de  $\text{NO}_x$  por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB.....68

**Figura 33-3:** Gráfico polar de la concentración de  $\text{NO}_2$  para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB.....69

**Gráfico 34-3:** Gráfico polar de la concentración de  $\text{NO}_2$  para periodos mensuales entre 2009 y 2011 estación Ferias .....70

**Figura 35-3:** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de  $\text{NO}_2$  por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB.....71

**Figura 36-3:** Gráfico polar de la relación de concentraciones  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB.....72

**Figura 37-3:** Gráfico función temporal  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_2$  para el período 2009-2011 estación de Simón Bolívar .....73

**Figura 38-3:** Gráfico polar de las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  de la estación en el período 2010-2011.....74

**Figura 39-3:** Gráfico polar de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  de la estación de Kennedy en el período 2010-2011.....75

**Figura 40-3:** Gráfica polar relación  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  estación Kennedy para el periodo 2010-2011.....76

**Figura 41-3:** Diagrama polar para la concentración de  $\text{PM}_{10}$  de las estaciones de la RMCAB.....77

**Figura 42-3:** Diagrama polar para la concentración de  $\text{O}_3$  de las estaciones de la RMCAB.....78

**Figura 43-3:** Diagrama polar para la concentración de  $\text{SO}_2$  de las estaciones de la RMCAB.....79

**Figura 44-3:** Diagramas polares para las concentraciones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  de la estación de Puente Aranda.....80

## Lista de anexos

	pág.
Anexo A. Graficas resumen de datos estaciones de la RMCAB .....	88
Anexo B. Gráficos polares de la concentración de PM <sub>10</sub> estaciones de la RMCAB.....	105
Anexo C. Grafico polar de la concentración de SO <sub>2</sub> .....	111
Anexo D. Gráfico polar de la concentración de ozono estaciones de la RMCAB.....	117
Anexo E. Gráfico polar de las concentraciones de NO <sub>x</sub> estaciones de la RMCAB.....	124
Anexo F. Grafico polar de las concentraciones de NO <sub>2</sub> estaciones de la RMCAB.....	129
Anexo G. Gráfico polar de las concentraciones de CO estaciones de la RMCAB.....	133
Anexo H. Rosa de los vientos estaciones de la RMCAB.....	135
Anexo I. Fotos satelitales de las estaciones de la RMCAB.....	147



## Introducción

La contaminación atmosférica urbana es un problema generalizado a nivel global, principalmente por los efectos que produce sobre la salud de las personas. El transporte y la actividad industrial demandan combustibles fósiles, que son los principales generadores de contaminación atmosférica, principalmente por material particulado, óxidos de nitrógeno, carbono y azufre (OMS, 2005).

Los gobiernos han decidido establecer normas de calidad del aire para proteger a la población de concentraciones perjudiciales para su salud y redes de monitoreo de calidad del aire para verificar el cumplimiento de dichas normas, así como para hacer un seguimiento de la efectividad de las medidas tomadas para reducir la contaminación (Tamsin, 2009). La información suministrada por la red de monitoreo permite encontrar tendencias y relaciones entre contaminantes, identificar fuentes emisoras y estudiar efectos de las condiciones de desarrollo urbano sobre la contaminación del aire (Clapp et al., 2001; Carslaw, 2011; Kent, et al., 2009; Defra, 2011).

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) consta de 14 estaciones automáticas que miden y registran concentraciones de contaminantes del aire y variables meteorológicas. Con base en estos registros, el equipo encargado de la RMCAB genera informes mensuales, trimestrales, anuales y especiales sobre el estado y las tendencias de la contaminación del aire en la ciudad. Los informes han mostrado que el material particulado y el ozono son los contaminantes que sobrepasan con mayor frecuencia la norma de calidad del aire, afectando principalmente a las poblaciones de las localidades de Kennedy, Puente Aranda y Fontibón, y dedican buena parte de su contenido a mostrar las tendencias temporales de los valores de concentración de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_x$  y  $CO$ . Con respecto a la información meteorológica, los informes muestran las estadísticas de las variables y las rosas de vientos. Sin embargo, los informes no incluyen un análisis de datos que permitan la identificación y localización de las fuentes de emisión monitoreados en diversas zonas de la ciudad, ni la relación entre los contaminantes y las variables meteorológicas, de manera que se ha desaprovechado parte del gran potencial que representa el contar con tan detallada información de contaminantes y variables meteorológicas.

### **Openair como herramienta de análisis de calidad del aire**

Openair es un paquete de funciones estadísticas y de visualización de información, basado en el software estadístico R, específicamente concebido con el propósito de procesar y analizar estadísticamente la información que se obtiene de la red de monitoreo de calidad del aire de una región y así poder realizar un mejor análisis del problema ambiental en relación con las fuentes emisoras y la meteorología de la región (Carslaw *et al*, 2011). Openair fue desarrollado en 2008 como un proyecto conjunto de las universidades *King's College London* y *University of Leeds* con financiación de las instituciones británicas *Natural Environment Research Council* y *Department for Environment, Food and Rural Affairs*.

Se utilizó Openair en la región de North Lincolnshire, con el fin de identificar fuentes de contaminación en el área de un complejo industrial cercano a una población, a partir de la información producida por una red de monitoreo de 16 estaciones entre 2003 y 2007 (Kent *et al*, 2009). Mediante el empleo de las herramientas de gráfico polar *PolarPlot* y la variación en el tiempo *timeVariation*, se logró separar e identificar el comportamiento de las fuentes de

combustión del complejo industrial y el del tráfico automotor, valiéndose del comportamiento temporal de cada tipo de fuente. Adicionalmente, empleando la función de datos condensados, se comprobó la tendencia a la disminución de la concentración de  $\text{SO}_2$  y al aumento significativo de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  para el período comprendido entre 2004 y 2007.

En un estudio similar en la región de Greater Wellington de Nueva Zelanda, Openair se utilizó para estudiar el comportamiento de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$  y se mostró el incremento en la concentración de  $\text{PM}_{10}$  por el uso de quemadores domésticos en el invierno del 2009 (Tamsin, 2009).

Openair fue aplicado a gran escala en el Reino Unido, para el estudio de los valores de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  (Sniffer, 2010). En este estudio se empleó el gráfico polar *PolarPlot* y se encontró que las mayores concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  estaban asociadas con vientos del Este a velocidades de vientos mayores a 10 m/s. Estos resultados se relacionaron con  $\text{PM}_{2.5}$  secundario proveniente de Europa continental. Este análisis permitió diferenciar e interpretar los valores altos de concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  en el sur del Reino Unido, con los menores valores de concentraciones en el Norte del país, determinando que el mayor aporte a la contaminación de  $\text{PM}_{2.5}$  era de naturaleza regional.

A partir de estas experiencias exitosas, se propuso en este trabajo implementar la herramienta Openair, en conjunto con el inventario de fuentes fijas de Bogotá, con el fin de lograr un mayor entendimiento de la localización y naturaleza de las fuentes de mayor impacto sobre los valores de las concentraciones de contaminantes del aire en cada estación de la RMCAB. Para lograr este propósito general, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la calidad y pertinencia de los informes de la red de monitoreo de calidad de aire de Bogotá (RMCAB) de la Secretaría Distrital de Ambiente.
- Determinar los tipos de análisis que ofrece Openair que pueden hacer más efectivo el uso de la información de la RMCAB
- Evaluar la calidad de la información disponible de la RMCAB mediante un análisis primario y depurarla.
- Reanalizar la información depurada con diversas herramientas de Openair y discutir su utilidad en el mejoramiento del conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá.

<i>Implementación del Software estadístico Openair.....</i>	<i>15</i>
---	-----------

# 1. Red de monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá

La red de monitoreo de Calidad del Aire en Bogotá (RMCAB) comenzó con 5 estaciones a mediados de la década de los años 60, mediante un proyecto adelantado en Latinoamérica por la Organización Panamericana de la Salud (OPS). En la década de los años 80, se ponen en funcionamiento trece estaciones, con el fin de darle respuesta al recién establecido Sistema de Información Sobre la Calidad del Aire (SICA), el cual buscaba encontrar la relación entre las enfermedades respiratorias y la contaminación ambiental debida a partículas en suspensión, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, entre otros.

A comienzo de la década de los años 90, el aumento en la preocupación por la contaminación del aire originó una investigación auspiciada por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), con el propósito de encontrar la relación entre calidad del aire con la meteorología y las de fuentes de contaminación, para lo cual se realizaron mediciones horarias de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, partículas suspendidas totales, CO, hidrocarburos no metánicos, metano e hidrocarburos totales, con 5 estaciones de monitoreo que fueron instaladas como parte del mejoramiento del sistema. La agencia planteó la necesidad de tener una red de monitoreo moderna para la ciudad, complementada con un modelo de calidad del aire para predecir el comportamiento futuro de la calidad del aire y simular escenarios futuros, introduciendo los posibles cambios en el desarrollo de la ciudad y realizar estudios de costo-beneficio (Uribe, 2005).

En la segunda mitad de la misma década, se diseñó e instaló la actual Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), a cargo del Departamento administrativo del Medio Ambiente (DAMA), hoy Secretaria Distrital del Ambiente (SDA, 2011). Finalmente, en 2008, se inició un proceso de modernización que contempló entre otras acciones:

- ✓ Aumento de cobertura espacial de medición de ozono
- ✓ Renovación de equipos
- ✓ Acceso a la comunidad para tener en tiempo real la información de calidad del aire y su relación con la salud mediante el Índice de Calidad del Aire.

## 1.1 Estaciones de monitoreo de la RMCAB

En la actualidad, la RMCAB cuenta con 14 estaciones automáticas, cuya información está disponible para su consulta en la página web de la SDA.

**Tabla 1-1:** Resumen de las características de las estaciones de la RMCAB. El nombre utilizado anteriormente para algunas estaciones se muestra entre paréntesis. Fuente: informes anuales de la SDA.

Estación	Período	Contaminantes	Variables meteorológicas*	Localidad
Carvajal (Sony)	1997-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , CO, PST, PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, pr.	Kennedy
Cazucá	1997-2009	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , CO, PST, PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, pr.	Ciudad Bolívar
Central de Mezclas	1998-2002	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, HR, RS, P, pr.	Tunjuelito
Chico (Santo Tomás)	1997-2010	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , O <sub>3</sub>	VV, DV, pr.	Chapinero
Engativá	1997-1999	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> ,	VV, DV, T, pr.	Engativá
Fontibón	1999-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, pr.	Fontibón
Guaymaral (Escuela)	1998-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, RS, HR, pr.	Suba
Kennedy	2005-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	VV, DV, T, RS, HR, pr.	Kennedy
Las Ferias (Carrefour)	2001-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, HR, pr.	Engativá
Olaya	1997-2001	NO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, pr.	Rafael Uribe
Puente Aranda (Merck)	1999-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, pr.	Puente Aranda
Sagrado Corazón (MAVDT)	1997-2002	NO, O <sub>3</sub>	VV, DV, pr.	Puente Aranda
Simón Bolívar (I.D.R.D.)	2003-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	VV, DV, T, RS, HR, pr.	Barrios Unidos
Suba (Corpas)	1997-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, pr.	Suba
Tunal	2006-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, RS, HR, pr.	Tunjuelito
Universidad Nacional	1997-2002	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub>	VV, DV y RS.	Teusaquillo
Usaquén (Bosque)	1997-2011	NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PST, PM <sub>10</sub>	VV, DV, T, pr.	Usaquén
Usme	2005-2010	-	VV, DV, T, RS, HR, pr.	Usme
Vitelma	2005-2010	-	VV, DV, T, RS, HR, pr.	San Cristóbal

\*VV: velocidad del viento, DV: dirección del viento, T: temperatura, P: presión, HR: humedad relativa, RS: radiación solar, pr: precipitación.

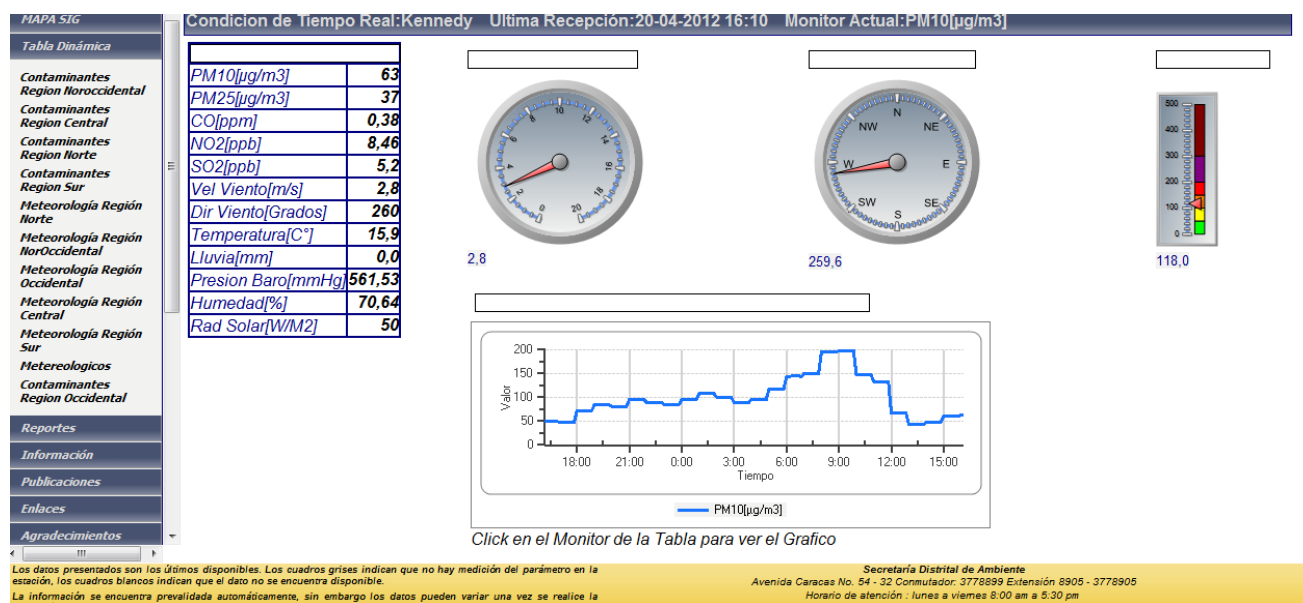
## 1.2 Informes de la RMCAB

El objetivo de la RMCAB es medir, registrar y analizar el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes con respecto a la norma establecida como referencia que rija en el momento para Bogotá. Para esto, la labor de la RMCAB se ve reflejada en dos actividades principales: reporte de información en línea y realización de informes especiales y periódicos.

### 1.2.1 Información en línea

La RMCAB muestra en línea la información de meteorología y concentración de contaminantes de las estaciones activas. Como ejemplo, la figura 1-1 muestra la imagen capturada del sistema de información en línea para la estación de Kennedy el día 20 abril 2012 a las 16:10, que incluye una tabla con los valores de concentración de contaminantes, y de las variables meteorológicas, así como el índice de calidad del aire.

**Figura 1-1:** Imagen capturada del sistema de información en línea de la RMCAB “Fuente: Página web de la RMCAB”



### 1.2.2 Informes especiales y periódicos

La RMCAB elabora informes especiales y periódicos empleando la base de datos obtenida de sus estaciones activas. Entre los informes especiales, se encuentran los reportes de los días sin carro en la ciudad. Los informes periódicos son trimestrales y anuales, los cuales analizan las concentraciones de material particulado y gases contaminantes para todas las estaciones que están activas para el año correspondiente. Los datos recolectados de las distintas estaciones se reciben en una estación central y se someten a un proceso de validación y posterior análisis, con el fin de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire en Bogotá dados por la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 y la Resolución 610 del 24 de Marzo de 2010, expedidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) SDA (2011).

Los datos seleccionados son analizados mediante técnicas de estadística descriptiva con dos propósitos principales: el primero, verificar el cumplimiento de la norma de calidad del aire en cada estación de monitoreo, mediante promedios móviles por hora, 8 horas, 24 horas y anual, dependiendo de lo exigido por la norma para cada contaminante, y mostrar el número de excedencias de la norma en el período analizado.

El segundo propósito es evaluar la tendencia temporal y espacial de la concentración de los contaminantes monitoreados. Mediante el empleo del gráfico de cajas y bigotes (*box plot*), se realiza un análisis temporal para mostrar las distribuciones de concentraciones cada día de la semana, cada mes del año y cada año para los últimos años 5 años. Igualmente se realiza un análisis espacial mediante una interpolación de concentraciones para  $PM_{10}$  y ozono sobre el mapa de Bogotá.

Finalmente, los informes muestran el Índice de Calidad del Aire (ICA) para cada contaminante, asociado al riesgo latente de cada contaminante sobre la salud de las personas. Se ha encontrado que los contaminantes que más riesgo presentan sobre la salud de la población en Bogotá son  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ . En menor proporción, el  $NO_2$ . El  $SO_2$  y el  $CO$  no se encuentran en concentraciones que signifiquen un riesgo para la salud de la población. Las localidades de Kennedy, Puente Aranda y Fontibón son las más afectadas. De la tendencia temporal, se encuentra que la concentración de  $PM_{10}$  aumenta de lunes a viernes y disminuye el fin de semana. Así mismo el análisis mensual muestra aumento de la concentración en el primer y tercer trimestre del año. El análisis espacial muestra que las concentraciones más altas de ozono se presentan en la zona norte y central y las de  $PM_{10}$  en la zona sur occidente.

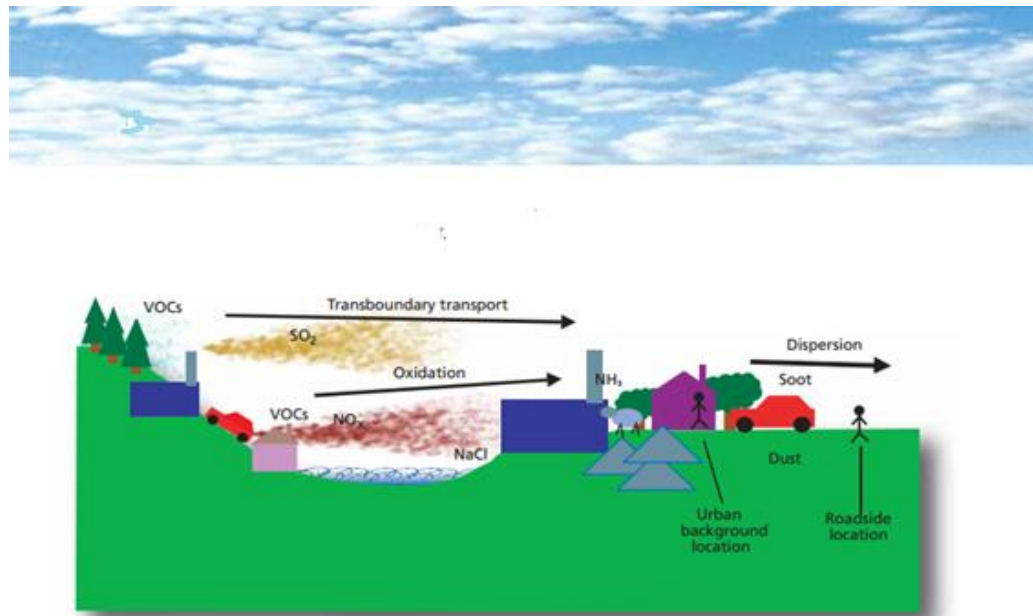
### 1.3 Fuentes de contaminación

Las sustancias que generan contaminación atmosférica pueden ser emitidas directamente a la atmósfera desde la fuente contaminante, o posteriormente después de haberse formado por reacciones químicas, las cuales toman tiempos de formación que van desde horas hasta días. En consecuencia, estas sustancias y sus precursores pueden viajar largas distancias. La figura 2-1 ilustra el proceso de formación y transporte de contaminantes (Defra. 2005).

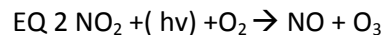
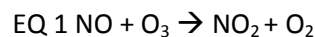
Un ejemplo de la formación de contaminantes secundarios corresponde al  $NO_2$  y el  $O_3$ . Los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) emitidos inicialmente son principalmente óxido y dióxido de nitrógeno, siendo el monóxido el de mayor proporción. El dióxido de nitrógeno primario, que se presenta en menor proporción, es el que tiene carácter de riesgo para la salud humana (Clap et al., 2001).

El ozono es un contaminante de carácter regional, que se encuentra en toda la extensión vertical de la troposfera.

**Figura 2-1:** Ilustración esquemática de la formación y transporte de material particulado “Fuente: Defra 2005”



Mediante la química atmosférica, las condiciones adecuadas y la cantidad relativa entre los óxidos de nitrógeno y ozono, se presentan conversiones de ozono a dióxido de nitrógeno y de este nuevamente a ozono, representado mediante las siguientes reacciones:



Por otro lado, las partículas secundarias están formadas principalmente por los precursores SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> y VOC<sub>s</sub> (Sniffer, 2010).

La contaminación que afecta a Bogotá tiene que ver tanto con las fuentes internas como con los centros industriales vecinos a la ciudad, pues puede ser transportada por vientos provenientes de dichos centros.

### 1.3.1 Fuentes de contaminación regional

De las 14 provinciales que maneja la CAR, se ha encontrado que las mayores emisiones de contaminantes se encuentra en Sabana Occidente, Alto Magdalena, Bogotá –la Calera, Sabana Centro y Soacha, como se observa en la Tabla 2-1 (Universidad Militar, 2008). Estos contaminantes pueden llegar a Bogotá en forma de contaminación primaria o secundaria.



**Tabla 2-1:** Carga contaminante calculada para las 5 regiones de mayor contaminación de jurisdicción de la CAR. Fuente: Universidad Militar (2008)

Provincial	MP ton /año	SO <sub>2</sub> ton /año	NO <sub>x</sub> ton /año	CO ton /año
Sabana Centro	4767,23	3334,68	1703,65	285,14
Soacha	1399,260	1106,709	460,534	130,094
Sabana Occidente	1492,657	1322,819	746,882	106,786
Alto Magdalena	962,05	748,98	396,25	83,23
Bogota rural y la Calera	2666,275	866,041	498,162	12,102

De la provincial de Sabana Centro se encontró que los municipios que más aportan en contaminación son Cogua, Nemocon y Cajicá. De la provincial de Soacha, los municipios de Soacha y Sibate aportan emisiones industriales aproximadamente en partes iguales. De la provincial Sabana Occidente, el municipio de Mosquera es el que más aporta, casi con un 50 % del total. De la provincial del Alto Magdalena se encuentra el municipio de Girardot como el que mas aporta en la carga contaminante.

Cajicá se encuentra al norte, aproximadamente a 20 Km de Bogotá. Cogua y Nemocon al norte y noreste respectivamente, a 40 Km aproximadamente. Mosquera se encuentra al occidente, a 15 Km aproximadamente. Soacha y Sibate se encuentran a 15 y 25 km aproximadamente de Bogotá respectivamente y sus emisiones llegan a Bogotá con vientos del sur-oeste. Girardot se encuentra a 80 Km al sur-oeste de Bogotá. La figura 3-1 muestra la ubicación de estos municipios.

**Figura 3-1:** Municipios cercanas a Bogotá con mayores emisiones de contaminantes industriales “Fuente: Elaboración propia utilizando Google Maps®”



### 1.3.2 Fuentes locales de contaminación

De acuerdo con el inventario de fuentes fijas de Bogotá (Behrentz et al., 2008) el mayor número de fuentes fijas que emplean carbón como combustible se encuentran en la localidades de Fontibón, Kennedy y Puente Aranda. La figura 4-1 muestra la georreferenciación de estas fuentes, así como las estaciones de la RMCAB y varias de las vías principales.

**Figura 4-1:** Sector industrial de las localidades de Kennedy, Fontibón y Puente Aranda donde se concentra la mayor carga contaminante generada en Bogotá por fuentes fijas que emplean carbón como combustible (indicadas con los números romanos) “Fuente: Elaboración propia utilizando Google Maps®”

Para el desarrollo de estas actividades, se tuvo en cuenta el comportamiento químico de los contaminantes, así como la dirección y velocidad de viento y la naturaleza de las fuentes emisoras. La tabla 3-1 contiene varias características de los contaminantes criterio, las cuales se tuvieron en cuenta en varios estudios que emplearon el programa Openair en la identificación de fuentes de contaminación (Sniffer, 2010; Carslaw, 2011; Kent et al, 2009)

**Tabla 3-1:** Características de los contaminantes  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  y material particulado

Contaminante	Observaciones
Ozono	<p>No es emitido directamente de fuentes antropogénicas</p> <p>Procede de reacciones químicas entre <math>NO_x</math> y VOCs por luz solar fuerte</p> <p>La formación puede tomar entre horas y días, por lo que puede formarse a partir de precursores emitidos por fuentes a cientos o incluso miles de kilómetros.</p>
Material particulado $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$	<p>El <math>PM_{2.5}</math> secundario se forma lentamente (entre horas y días), por tanto las fuentes contaminantes pueden tener influencia a cientos de kilómetros. Lo anterior hace que el <math>PM_{2.5}</math> viaje en la dirección del movimiento del viento desde las fuentes emisoras y como consecuencia hay una distribución razonablemente uniforme de concentración a nivel regional.</p> <p>La concentración primaria es generada por procesos de combustión tanto de autos como de industrias, así como, de partículas producidas por desgaste de llantas y frenos e igualmente, de minerales de los materiales de construcción.</p> <p>La concentración secundaria inorgánica es producida principalmente por amoníaco, <math>SO_2</math> y <math>NO_x</math>.</p> <p>La concentración puede provenir tanto fuentes locales como regionales principalmente industriales y vehiculares</p> <p>El <math>PM_{2.5}</math> es subconjunto del <math>PM_{10}</math> por tanto el coeficiente de correlación entre ellos es alto. La relación entre <math>PM_{2.5}</math> y <math>PM_{10}</math> depende del sitio de medición teniendo valores altos cerca de carreteras y bajos en zonas rurales.</p> <p>Se puede presentar variación en el de coeficiente de correlación entre <math>PM_{2.5}</math> con <math>NO_2</math>, <math>SO_2</math> y <math>O_3</math>, siendo mayor con el Ozono debido a la formación fotoquímico que experimentan los dos.</p> <p>Las más altas concentraciones de <math>PM_{10}</math> se presentan en los meses secos debido en parte a la resuspensión y el aterrizaje de plumas elevadas por la inestabilidad atmosférica</p> <p>La fracción más gruesa de <math>PM_{10}</math> está más asociada con emisiones fugitivas que con los procesos de combustión.</p> <p><math>PM_{grueso}</math> ha sido calculado como <math>PM_{10} - PM_{2.5}</math>, que representa la fracción de <math>PM_{10}</math> más atribuible a fuentes de polvo.</p>
$SO_2$	<p>Sus emisiones son dominadas por combustión de combustibles con azufre, tales como carbón y aceites pesados.</p>
$NO_x$	<p>Todos los procesos de combustión producen <math>NO_x</math></p> <p>El transporte es la principal fuente, seguida por los sectores industrial y comercial.</p>
$CO$	<p>Formado por combustión incompleta de combustibles que contienen carbón.</p> <p>La principal fuente es el transporte</p>

### 1.4.1 Clasificación de las estaciones de monitoreo

Las estaciones de monitoreo de la calidad del aire están situadas en una variedad de ambientes, con el propósito de valorar la calidad del aire en un área determinada debido a la contaminación producida por las diferentes fuentes locales, desde el tráfico automotor y las fuentes industriales, hasta el ambiente de sectores urbanos y rurales. La tabla 4-1 contiene la descripción de los diferentes sitios donde operan las estaciones de monitoreo (Defra, 2005).

**Tabla 4-1:** Clasificación de los ambientes de monitoreo propuestos “Fuente: Defra, 2005”

Tipo de estación	Observaciones
Urbana	Área caracterizada por construcciones urbanas de edificios de al menos 2 pisos. La calidad del aire es representativa de algunos kilómetros cuadrados.
Suburbana	Área de edificaciones de cualquier tamaño mezclada con áreas no urbanizadas como agrícola, lagos o bosques. La calidad del aire medida es representativa de algunas decenas de Km <sup>2</sup> .
Rural	Áreas situadas a más de 20 Km de las aglomeraciones urbanas y más de 5 Km de áreas construidas o instalaciones industriales o autopistas. La calidad del aire es representativa de áreas de más de 1000 Km <sup>2</sup> .
Tráfico	Su localización evalúa las emisiones del tráfico cercano procedente de carreteras o autopistas. La calidad del aire es representativa de un segmento de vía mayor de 100 m. Sus puntos de muestreo deben estar cerca de los cruces principales y las aceras peatonales.
Industriales	Mide el nivel de contaminación de fuentes industriales cercanas o áreas industriales con muchas fuentes emisoras.
Estación de fondo ( <i>Background station</i> , por su nombre en inglés)	Su localización mide el nivel de contaminación que no es influenciado significativamente por una única fuente o avenida si no por la contribución de todas las fuentes situadas a barlovento de la estación ósea es la contaminación que viene con el viento que se acerca a la estación.



**Figura 5-1:** Fotografía de una estación de monitoreo tipo tráfico “Fuente: Tamsin 2009”



### 1.4.2 Herramientas del programa Openair

El programa Openair tiene aproximadamente 23 funciones principales y 8 funciones de utilidad. Adicionalmente, el proyecto Openair produce periódicamente nuevas aplicaciones y mejoras a las existentes. En los estudios realizados con Openair, se produce un importante número de gráficos y se seleccionan aquellos que muestran algo particularmente útil o informativo (Hayes et. al, 2009). Las funciones más comúnmente empleadas son: rosa de los vientos (*windRose*), gráfico polar (*polarPlot*), gráfico de resumen de datos (*summaryPlot*), variación temporal (*timeVariation*), tendencias suavizadas (*smoothTrend*) y regresión lineal (*TheilSen*).

La tabla 5-1 presenta las principales herramientas de Openair agrupadas por su principal aplicación. Varias funciones pueden emplearse para efectuar análisis similares.

**Tabla 5-1:** Herramientas de Openair agrupadas por similitud en su utilidad

<b>Función</b>	<b>Elemento principal de análisis</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gráfica de resumen de datos</li> </ul>	Genera una gráfica donde se resumen los datos de cada estación.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Rosa de Vientos:</li> </ul>	Muestra la variación de dirección y velocidad de viento por año
<ul style="list-style-type: none"> <li>Rosa percentil</li> <li>Gráfico polar de frecuencias</li> <li>Gráfico polar</li> <li>Rosa de Contaminantes</li> <li>Gráfico temporal anular</li> </ul>	Estas herramientas permiten relacionar, la concentración de los contaminantes con la dirección y/o velocidad del viento.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gráfico temporal anular</li> <li>Función Gráfico de tiempo</li> <li>Gráfico calendario</li> <li>Variación Temporal</li> <li>Datos condensados</li> </ul>	Estas herramientas permiten evaluar los valores de concentración en función de diferentes escalas de tiempo.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Regresión Lineal:</li> <li>Tendencias Suavizadas</li> </ul>	Permiten estimar tendencias en forma cualitativa y cuantitativa.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Matriz de Correlación:</li> <li>Diagrama de dispersión:</li> <li>Relación Lineal</li> </ul>	Estudio de relación de variables.

El análisis con las herramientas anteriores se puede ampliar empleando varias funciones adicionales que tiene Openair. La tabla 6-1 presenta algunas de las más usadas y su descripción.

**Tabla 6-1:** Funciones de ayuda de Openair

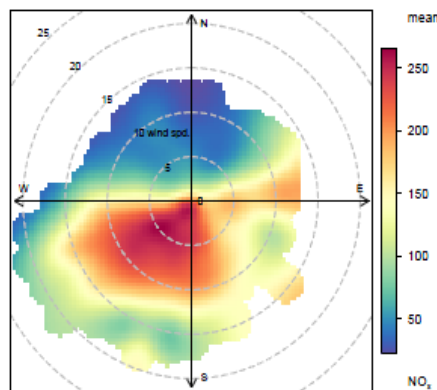
<b>Nombre</b>	<b>Característica</b>
<i>Type</i>	Es una de las principales herramientas del grupo de opciones de las funciones, ya que permite condicionar las funciones básicas, para ampliar el análisis en diferentes aspectos; por ejemplo: dirección, velocidad de viento, períodos de tiempo o relacionar concentración de contaminantes.
<i>Min.bin</i>	Indica el menor número de puntos permitidos para cada casilla en una dirección y velocidad de viento. Es una herramienta de ayuda que evita valores aislados de concentraciones extrañamente altas, que puedan llegar afectar la regularidad de la información.
<i>Subset</i>	Permite seleccionar un subgrupo de datos de la serie de datos.
<i>Ratio</i>	Permite generar una nueva variable definida como la relación de dos contaminantes, sin tener problemas cuando el denominador sea cero. Por ejemplo, la relación entre las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> o entre NO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> .
<i>SelectByDate</i>	Permite seleccionar series de datos por fecha.

Varias de las herramientas de Openair han sido utilizadas más frecuentemente que otras. Entre ellas, las gráficas polares han sido de gran utilidad en el análisis de procedencia de los valores altos de concentración de contaminantes.

### 1.4.2.1 Gráficas polares

Son gráficos que muestran la variación de la concentración de un contaminante por dirección y velocidad del viento. Estos gráficos usan la técnica de suavizamiento estadístico para mostrar una superficie continua (Carslaw, 2011). El origen del gráfico indica la posición de la estación. El valor de cero grados corresponde a la dirección norte y este valor aumenta en el sentido de las manecillas del reloj. La velocidad del viento aumenta a medida que se aleja del origen. Por tanto, valores de alta concentración de un contaminante, medidos a altas velocidades del viento proveniente de cierta dirección, significará que la fuente aportante de dicha contaminación se ubicará en dicha dirección a gran distancia del origen. Concentraciones altas a bajas velocidades de viento o viento en calma estarán asociadas a fuentes cercanas al origen. Estos gráficos han sido empleados ampliamente en los diferentes estudios realizados con Openair como medio de ayuda para identificar la dirección, distancia y naturaleza de la contaminación (Sniffer, 2010; Carslaw, 2011; Kent et al, 2009; Hayes et al, 2009).

**Figura 6-1:** Ejemplo de gráfico *PolarPlot* correspondiente a la estación Marylebone Road (UK). “Fuente: Manual de usuario de Openair”

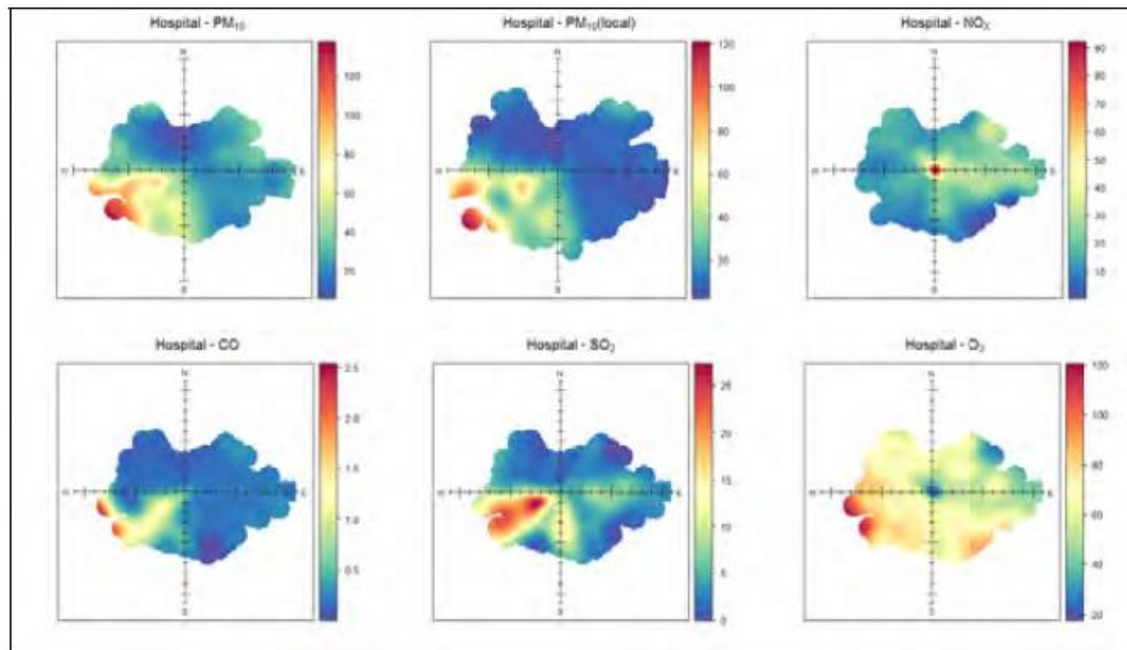


Los estudios anteriores exponen varias recomendaciones para la interpretación de los gráficos:

1. Generar y comparar los gráficos *polarPlot* de la misma estación con sus respectivos contaminantes registrados (el resultado será más exitoso entre más contaminantes se tengan monitoreados) para encontrar similitudes o diferencias entre ellos y poder predecir naturaleza de la fuente que los emitió (Figura 7-1). Igualmente, analizar los gráficos en diferentes sitios con el mismo contaminante, para un estudio de triangulación, de tal manera que permita determinar la ubicación geográfica de fuentes importantes de contaminación (Figura 8-1).

2. Si se observan valores bajos en la concentración de los contaminantes a bajas velocidades indica que no hay impactos significativos del contaminante cerca a la estación.
3. Si se observan concentraciones elevadas con altas velocidades de viento, puede ser indicio de tres formas de contaminación: chimeneas altas (donde la turbulencia resulta en el descenso de los penachos de contaminación), resuspensión de polvo (cuando el viento es capaz de levantarlo) o que procede de fuentes lejanas o regionales.
4. El tráfico contribuye a concentraciones de material particulado y  $\text{NO}_2$  cerca a la vía
5. La similitud entre los gráficos de PM,  $\text{NO}_x$  y CO es característica de tráfico automotor.
6. La similitud en los gráficos de  $\text{PM}_{10}$  con CO y  $\text{SO}_2$  es indicio de fuentes de combustión estacionarias.
7. El ozono se presenta casi en todas las direcciones.
8. Se sugiere que el  $\text{PM}_{2.5}$  es aportado principalmente por el tráfico.

**Figura 7-1:** Ejemplo de comparación de gráfico polar para los contaminantes  $\text{PM}_{10}$ , CO,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$



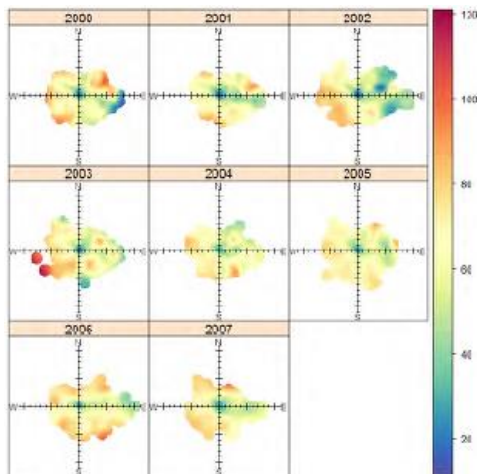


**Figura 8-1:** Triangulación de 2 gráficas *polarPlot* para un problema de contaminación de una acería ubicada en el sitio Port Labor en el Reino Unido



El gráfico polar puede generar gráficas año por año, lo que permite comparar los cambios en el comportamiento de los contaminantes entre un año y otro. La figura 9-1 muestra el gráfico *PolarPlot* para el ozono en la región Neath Port Talbot en el Reino Unido (Hayes et al., 2009).

**Figura 9-1:** Gráfico polar de estudio de la tendencia de ozono entre 2000 -2009 en la región Port Talbot “Hayes et al, 2009”



<i>Implementación del Software estadístico Openair.....</i>	<i>30</i>
---	-----------

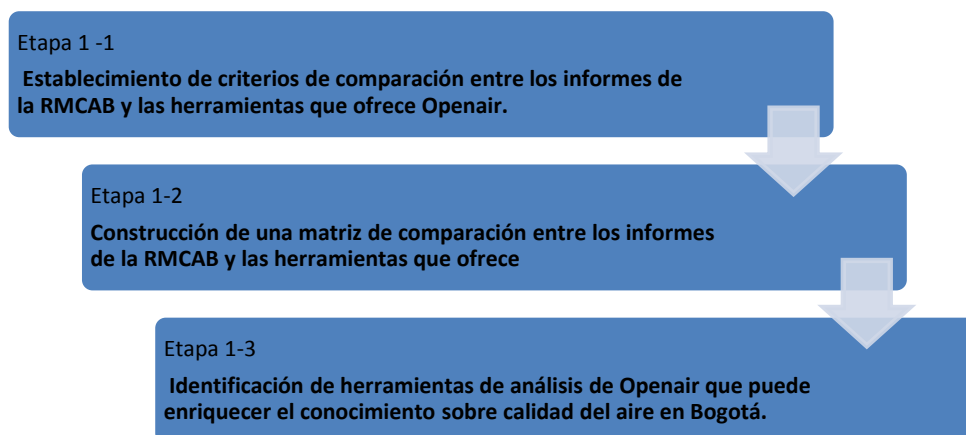
## 2. Metodología

La evaluación de la información producida por la RMCAB planteada en este estudio se llevó a cabo en 3 fases. La primera fase consistió en analizar los informes periódicos de la red y contrastarlos con las posibilidades de análisis de datos que ofrece la aplicación Openair. En la segunda fase, se hizo un análisis primario de la base de datos con el fin de detectar los problemas más comunes de continuidad y porcentaje de captura. Finalmente, en la fase 3, se analizaron los datos mediante diversas herramientas de Openair que permitieran generar conocimiento acerca de las posibles fuentes de contaminación en la ciudad. A continuación se describen en detalle las actividades realizadas en cada fase.

### 2.1 Primera fase: Contraste entre los análisis incluidos en los informes periódicos de la RMCAB y las posibilidades que ofrece la aplicación Openair

La primera fase se llevó a cabo a su vez en tres etapas, mostradas en la Figura 10-2

**Figura 10-2:** Etapas de la primera fase



### **2.1.1 Etapa 1-1. Establecimiento de criterios de comparación entre los informes de la RMCAB y las herramientas que ofrece Openair**

Para el establecimiento de los criterios de comparación entre los informes de la RMCAB y las herramientas que ofrece Openair, se consultaron los Informes Anuales de la Calidad De Aire De Bogotá generados por la RMCAB entre los años 2008 y 2011, SDA (2011). Igualmente, se consultaron los resultados de estudios realizados en el Reino Unido en algunos lugares donde han sido aplicadas las herramientas de Openair: el condado de Lincolnshire, (Kent et al., 2009), Puerto Talbot (DEFRA, 2011) y la región de Greater Wellington de Nueva Zelanda (Tamsin, 2009). Así mismo, se consultó en el manual de Openair la descripción y utilidad de sus herramientas de análisis de datos.

A partir de las actividades anteriores, se propusieron varios criterios para comparar los informes de la RMCAB y los resultados que se pueden obtener con las herramientas de Openair aplicados a la información de una red de calidad del aire.

### **2.1.2 Etapa 1-2. Construcción de una matriz de comparación entre los informes de la RMCAB y las herramientas que ofrece Openair**

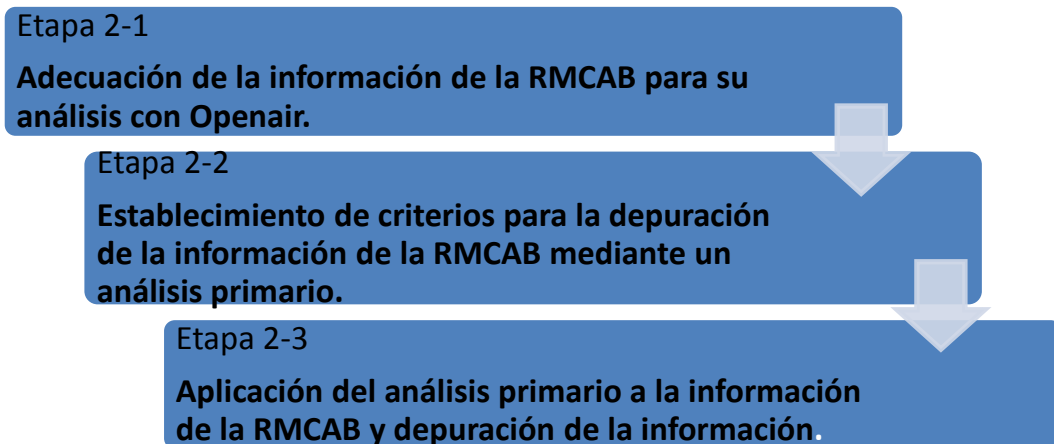
Se estableció una matriz de comparación con los criterios propuestos en la etapa 1, entre los informes de la RMCAB y los tipos de análisis de información de Openair, de tal manera que, se pudieran posteriormente identificar herramientas hasta ahora no utilizadas en el análisis de los datos de la RMCAB que pudieran generar nuevo conocimientos sobre la calidad del aire en Bogotá.

### **2.1.3 Etapa 1-3. Identificación de herramientas de análisis de Openair que puede enriquecer el conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá**

Se realizaron pruebas preliminares de las herramientas incluidas en el paquete Openair con la base de datos provista por sus autores, correspondiente a la estación de Marylebone Road, Reino Unido, con el fin de verificar su correcto funcionamiento y familiarizarse con la forma de operación del paquete. Igualmente, se consultaron resultados de la aplicación de Openair en estudios realizados en el Reino Unido (Kent et al, 2009; Carslaw et al, 2011; Sniffer, 2010) con el fin de dimensionar su potencial aporte.

## **2.2 Segunda fase. Depuración de la información disponible de la RMCAB mediante un análisis primario.**

La segunda fase se ejecutó en tres etapas, mostradas en la Figura 11-2

**Figura 11-2:** Etapas de la segunda fase

### **2.2.1 Etapa 2-1. Adecuación de la información de la RMCAB para su análisis con Openair**

La base de datos de RMCAB fue suministrada por la SDA como un conjunto de archivos de MSEXcel®, cada uno correspondiente a un año de registro y en archivos separados por contaminantes. Por ejemplo, para el período 1997-2010, se recibieron 3 directorios: uno para material particulado, uno para monóxido de carbono y un tercero para óxidos de nitrógeno y ozono, cada directorio con archivos anuales. El directorio con información de registros de dióxido de azufre fue recibido posteriormente. Finalmente, se recibió información de 2011.

Para emprender el análisis, se reorganizó la información para obtener un archivo de MSEXcel® por cada estación para todo el período y convertir su formato a valores separados por comas (.csv), de manera que se pudieran importar en Openair (Carslaw, 2011).

### **2.2.2 Etapa 2-2. Establecimiento de criterios para la depuración de la información de la RMCAB mediante un análisis primario**

Para el establecimiento de criterios de depuración de la información de la RMCAB, se hizo un análisis preliminar de las series de datos para determinar los años con registros suficientes para llevar a cabo un análisis confiable de la información, considerando su porcentaje de captura. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones del IDEAM para la validación de datos en Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (IDEAM, 2011). Estas recomendaciones sugieren el análisis de características particulares de los datos, tales como: datos sin sentido físico y valores de las relaciones entre las concentraciones de sustancias contaminantes. Por ejemplo, el valor de la concentración del  $PM_{10}$  siempre debería ser mayor que el de  $PM_{2.5}$  y el valor del  $NO_x$  siempre

debe ser mayor que el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{NO}$ . Para esta revisión, se empleó la herramienta de visualización de la serie de tiempo *timeplot*.

Con respecto a la relación entre sustancias contaminantes, el IDEAM (2011) establece que debería presentarse una correlación negativa entre las concentraciones de  $\text{O}_3$  y de  $\text{NO}_2$ , dadas las reacciones químicas en las que participan estas especies en la atmósfera. Así mismo, establece una correlación positiva entre el valor de la concentración del  $\text{SO}_2$  y el  $\text{PM}_{10}$ , dada la naturaleza de sustancia precursora del  $\text{SO}_2$  para el  $\text{PM}_{10}$ , así como una correlación positiva entre el  $\text{NO}_x$  y el  $\text{CO}$ , dadas sus fuentes comunes. Para evaluar estas relaciones entre contaminantes, se empleó la herramienta gráfica de correlación de Openair, *corrplot*, la cual estima el coeficiente de correlación de Pearson para cada par de contaminantes.

### **2.2.3 Etapa 2-3. Aplicación del análisis primario a la información de la RMCAB y depuración de la información**

Para realizar la depuración de datos, se elaboraron dos matrices: la primera permitió agrupar las estaciones por períodos de operación y contaminantes registrados; la segunda, registrar el porcentaje de captura de todos los contaminantes en cada una de las estaciones seleccionadas. Estas dos matrices sirvieron para generar un concepto sobre la calidad de la información suministrada por la RMCAB, así como seleccionar estaciones y un período de análisis.

Finalmente, se emplearon las recomendaciones del IDEAM (2011) utilizando las herramientas variación en tiempo y Gráfico de correlación, para los contaminantes y estaciones seleccionadas.

## **2.3 Tercera fase. Análisis de la información depurada y generación de conocimiento adicional sobre la calidad del aire en Bogotá mediante Openair.**

La tercera fase se ejecutó en tres etapas, mostradas en la figura 12-2.

**Figura 12-2:** Etapas de la tercera fase

#### Etapa 3-1

Análisis de la información depurada y generación de conocimiento adicional sobre la calidad del aire en Bogotá mediante Openair.



#### Etapa 3-2

Evaluación del desempeño de Openair en la generación de nuevo conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá.

El análisis con el programa Openair exigió la realización de una gran cantidad de gráficas. Para el análisis de los resultados, se presentaron en algunas aplicaciones los resultados de las 10 estaciones, pero, en otros casos, donde se obtenían resultados similares, se presentaron las gráficas de una muestra de estaciones como ejemplo ilustrativo. La totalidad de las gráficas se observan en anexos.

### 2.3.1 Etapa 3-1 Análisis de la información depurada con las diversas herramientas de Openair

Se utilizó la información correspondiente al período 2009 - 2011 de las 10 estaciones de la RMCAB: Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda, Tunal, Simón Bolívar, Ferias, Suba, Guaymaral y Usaquén. Para seleccionar los años seleccionados, de acuerdo al porcentaje de captura mayor del 75%, se empleó la herramienta selección de fecha *selectbydate*.

Se hizo un análisis para relacionar las mayores concentraciones de las sustancias contaminantes:  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$  con la dirección y velocidad del viento, empleando las herramientas: gráfico polar y gráfico polar anular, utilizando la información seleccionada de acuerdo al criterio de porcentaje de captura.

### 2.3.2 Etapa 3-2 Evaluación del desempeño de Openair en la generación de nuevo conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá

Como complemento a los análisis corrientes de los informes de la RMCAB y buscando generar nuevo conocimiento sobre la relación entre fuentes y contaminantes en la ciudad, se analizó la relación que se presenta entre los contaminantes  $NO_x$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ , así como, entre  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ . Se evaluaron así las posibles asociaciones de contaminación producidas por locales y regionales.

#### 2.3.2.1 Análisis relación de concentración sistema $NO_2/NO_x$ – Ozono

Se analizó la asociación que se presenta entre  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{O}_3$ . Se determinó y graficó el valor de la relación  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  de las estaciones de la RMCAB que contaban con esta información, empleando el gráfico polar de  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ . Igualmente, se comparó la variación temporal de las concentraciones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$ , y  $\text{O}_3$ .

### 2.3.2.2 Análisis de concentración de $\text{PM}_{2.5}$

Se analizó la asociación que se presenta entre las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , mediante gráficas polares de las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  y la razón de contaminantes  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  para la estación de Kennedy, dado que, es la única estación que contaba con la información necesaria para este análisis.

### 2.3.2.3 Análisis de la variación espacial de la concentración

Se evaluó la posible relación entre la contribución a altas concentraciones de  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{NO}_x$  de las distintas fuentes de contaminación, con los resultados obtenidos por Openair. Para esto se utilizó la información de georreferenciación de aproximadamente 80 empresas de la zona Industrial de Bogotá que empleaban carbón como combustible en sus procesos productivos, proveniente del inventario de fuente fijas de la ciudad (*Behrentz et al, 2008*).

Empleando la aplicación Google Maps®, se realizaron mapas de Bogotá sobre los que se ubicaron los gráficos polares de los contaminantes  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{SO}_2$ , de tal manera que, se pudiera visualizar y proponer posibles relaciones entre las fuentes de contaminación local y regional y la información registrada en la RMCAB. Para los contaminantes de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{CO}$  se realizó un análisis similar, sin embargo se encontró que era más sencillo dado que sus mayores concentraciones son de naturaleza local y se presentan casi siempre en el origen del gráfico polar.

Se construyó una matriz resumen que pudiera facilitar la comprensión del problema y se propusieron posibles asociaciones entre las distintas fuentes de contaminación y los informes de la RMCAB. Se emplearon los resultados obtenidos en las gráficas polares de los contaminantes  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{NO}_x$  de las estaciones de la RMCAB.



<i>Implementación del Software estadístico Openair.....</i>	<i>37</i>
---	-----------

## 3. Resultados

### 3.1 Primera fase: Contraste entre los análisis incluidos en los informes periódicos de la RMCAB y las posibilidades que ofrece la aplicación Openair

De acuerdo con la comparación entre los informes de la RMCAB y los estudios realizados con Openair se sugirieron los siguientes criterios:

- Análisis meteorológico
- Análisis de concentración de contaminantes
- Análisis de fuentes de contaminación
- Análisis de calidad del aire
- Análisis de tendencias
- Actualización

La Tabla 7-3, muestra la matriz de comparación entre la información potencialmente suministrada por Openair y el tipo de resultados producidos por la RMCAB y consignados en sus informes, al aplicar los criterios definidos.

**7-3: Criterios de comparación entre informes de la RMCAB y estudios realizados con Openair**

<b>Criterio</b>	<b>Informes de la RMCAB</b>	<b>Resultados programa Openair</b>
Análisis meteorológico	Describe el comportamiento en forma detallada de: velocidad y dirección de viento, temperatura superficial, humedad relativa del aire, presión atmosférica y radiación. Se hace uso de tablas, gráficos y mapas. Sin embargo el reporte de los resultados meteorológicos se generan en forma independiente a los valores de concentración de las sustancias contaminantes.	Openair procesa la información de tal manera que permite relacionar dirección y velocidad de viento con la concentración de contaminantes para explicar el efecto de posibles fuentes de contaminación local y regional. Para esto emplea diversas herramientas entre las cuales están: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rosa percentil</li> <li>• Gráfico polar de frecuencias</li> <li>• Gráfico polar</li> <li>• La Rosa de Contaminantes</li> <li>• Gráfico temporal anular</li> </ul>
Análisis de concentración de contaminantes	El valor de la concentración de los contaminantes: material particulado, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> y ozono, se procesan por estación en diferentes períodos de tiempo: año, mes y día de la semana. Estos informes permiten conocer excedencias y fechas de episodios; y comparar con las normas vigentes. Se Presentan mapas del comportamiento de las sustancias contaminantes en Bogotá. No se hace análisis de NO <sub>x</sub>	El programa Openair ofrece diversas herramientas que permiten relacionar las sustancias contaminantes entre sí, por lo tanto, el usuario pueda generar sus propios informes de acuerdo a las necesidades. Para esto Openair tiene varios comandos que permiten esta opción. Entre los más usados: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Type</li> <li>• Ratio</li> </ul>
Análisis de fuentes de contaminación	Los informes no mencionan las posibles fuentes de contaminación que pueden estar influyendo en los registros de los contaminantes en las estaciones de la RMCAB.	En los estudiados realizados con Openair siempre se identifican las posibles fuentes regionales y locales.
Análisis de Calidad del aire	La información de los informes está dedicada casi exclusivamente a mostrar los resultados de cada estación y su comparación con la norma vigente para cada contaminante.	Openair posee comandos que ayudan a determinar valores estadísticos. Para evaluar normas de calidad del aire se puede calcular la media móvil con el comando <b>rollingMean</b>
Análisis de Tendencias	Los informes describen la tendencia de los contaminantes: PM <sub>10</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO y O <sub>3</sub> usando tablas con promedios anuales empleando gráficos de cajas para promedio 24 horas, con los valores históricos desde el año 2005.	Openair tiene dos herramientas para el estudio de tendencia: Función suavizada y Regresión lineal MannKendall/TheilSen
Actualización	Al observar los informes desde el 2008 hasta el 2011, no se encuentran cambios importantes en las herramientas empleadas ni análisis de los resultados.	El programa Openair desde su creación en el año 2009 hasta la fecha ha tenido actualizaciones de aproximadamente dos por año, con el fin de ofrecer nuevas herramientas, o mejoras de las actuales. ( <a href="http://www.openair-project.org/">http://www.openair-project.org/</a> )

Se identificaron las herramientas de análisis de Openair que puede enriquecer el conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá, las cuales pueden clasificarse en dos grupos. El primer grupo corresponde a las funciones básicas, las cuales, permitieron evidenciar inicialmente las posibles fuentes de generación de contaminantes primarios y sus precursores. Estas funciones fueron aplicadas y generaron resultados con los que se obtuvieron conclusiones en los estudios de Kent et al (2009), Carslaw *et.al* (2011) y Sniffer (2010). Las funciones empleadas fueron gráfica polar, Gráfico polar anular, rosa de los vientos, rosa percentil, variación temporal, y tendencias suavizadas.

El segundo grupo corresponde a un conjunto de herramientas opcionales que se emplearon con las funciones básicas y permitieron profundizar los resultados generados, lo cual ayudó a evaluar el comportamiento de la concentración de contaminantes en diversos períodos de tiempo y la relación  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ , entre otras. Estas herramientas corresponden a las funciones: tipo, subconjunto, relación y selección por fecha.

### 3.2 Segunda fase. Depuración de la información disponible de la RMCAB mediante un análisis primario.

La información fue suministrada por la RMCAB en formato de hoja de cálculo de MSExcel® y se adaptó a formato plano CSV (valores separados por comas), como lo requiere Openair. Se utilizaron dos juegos de nombres correspondientes para su interpretación, como lo muestra la Tabla 8-3.

**Tabla 8-3:** Instrucción de introducción de parámetros a evaluar en el programa

Fecha	Velocidad viento	Dirección Viento	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	CO	$\text{O}_3$	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$
Date	ws	wd	nox	so2	no2	co	o3	pm10	pm2.5

Se omitieron los campos de datos que no contienen valores numéricos al generar el archivo a ser utilizado por Openair.

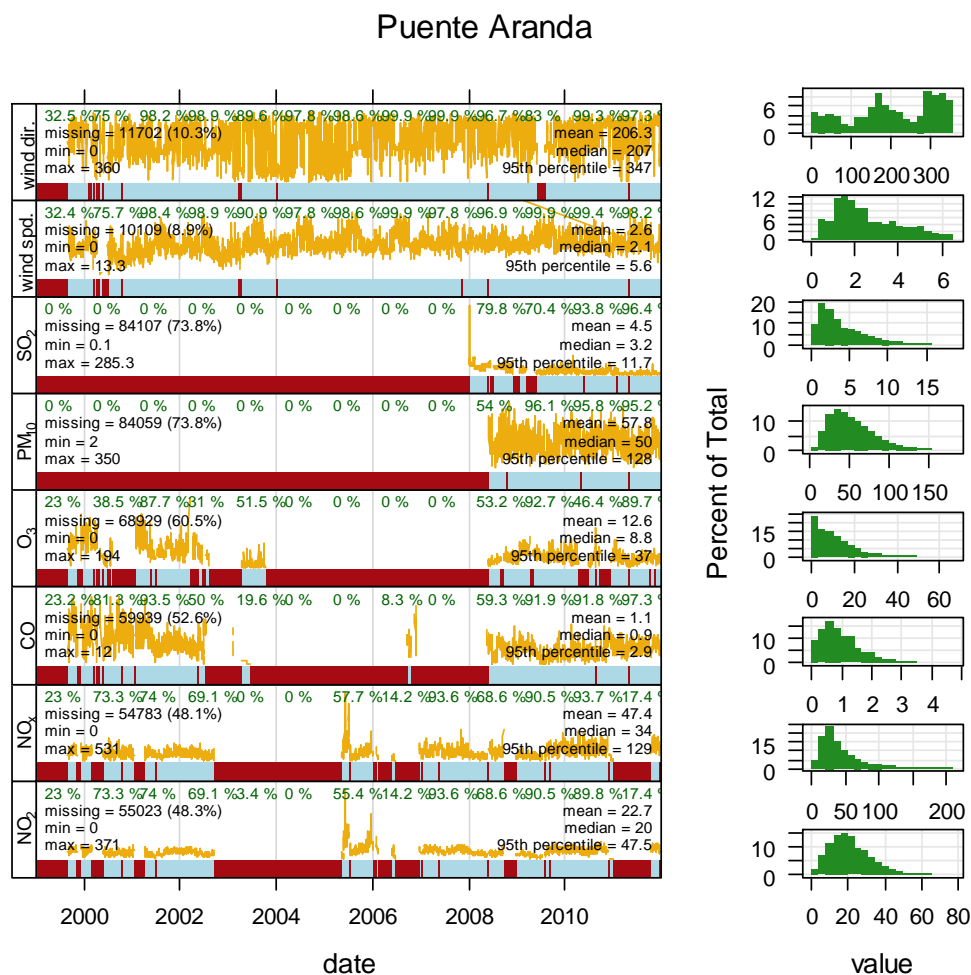
Se propusieron los siguientes criterios de depuración a la información de la RMCAB para poder tener un buen desempeño con el programa Openair:

1. Selección de las estaciones de la RMCAB que estaban activas al año 2011.
2. Período histórico de las estaciones seleccionadas, correspondiente a los últimos años donde presentaron una adecuada coincidencia entre ellas en el volumen de información, para realizar análisis comparativos.

3. Porcentaje de captura mayor del 75% para la concentración de contaminantes, de tal manera que, se pueda tener una cantidad representativa de información por año.
4. Recomendaciones de la Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA existentes en Colombia – GPVD (IDEAM, 2011) para análisis de contaminantes.

Como ejemplo se muestra la gráfica de resumen de datos de Openair para la estación de Puente Aranda (Figura 13-3). Esta gráfica muestra para todo el periodo los valores estadísticos más importantes de los datos procesados, tales como: media, mediana, valor mínimo y máximo, percentil 95 y el histograma. Así mismo, se puede observar gráficamente la representación de los datos existentes y faltantes, representados por las franjas en azul y rojo respectivamente. Se observa la falta de continuidad en la información de todos los contaminantes, principalmente antes del año 2008. El valor del porcentaje de captura de los contaminantes para cada año se encuentra en color verde en la parte superior de cada franja, por ejemplo el  $\text{NO}_x$  tuvo un porcentaje de captura del 17,4 % para el año 2011.

**Figura 13-3:** Gráfica Resumen de datos estación Puente Aranda período enero 1999- dic. 2011



A continuación se muestran los resultados de la aplicación del análisis primario a la información de la RMCAB y depuración de la información.

### 3.2.1 Primer criterio: Selección de estaciones de la RMCAB y período histórico

La base de datos de la RDMCAB contiene la información meteorológica y de concentración de contaminantes atmosféricos criterio de 20 estaciones, localizadas en Bogotá desde el año 1997 hasta el año 2011. Aproximadamente 50% de estas estaciones no se encuentran activas actualmente.

La tabla 9-3 resume los elementos más importantes de las estaciones, y las agrupa principalmente por período histórico. Esta información fue generada por la función resumen de datos de Openair.

**Tabla 9-3:** Principales características de las 20 estaciones de la RDCAB a tener en cuenta para su aplicación en el programa Openair

Estaciones	Observaciones
Cade energía, Universidad nacional, Olaya Engativa, Central de mezclas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estuvieron en operación entre 1997 y 2004.</li> <li>Registraron los contaminantes: NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PST</li> <li>La de menor tiempo en operación fue Engativa (1997-1999) y la de mayor período Cade Energía (1997- 2004)</li> </ul>
Sagrado Corazón, Cazucá, Chico Lago.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estuvieron en operación entre 1997 y 2010 actualmente no se encuentran activas</li> <li>Registraron los contaminantes: NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PST y CO</li> <li>Información incompleta en el período 2008- 2010</li> </ul>
Usme, Vitelma.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solamente manejan información meteorológica</li> </ul>
Usaquén, Carvajal, Suba, Guaymaral, Fontibón, Puente Aranda, Ferias, Simón Bolívar, Kennedy y Tunal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estuvieron en operación entre 1997 y 2011 actualmente se encuentran activas.</li> <li>Registraron los contaminantes: NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PST, CO, PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub></li> <li>Información relativamente completa en el período 2008-2011</li> </ul>

Con base en el período histórico reportado para cada estación y en la disponibilidad de información actualizada a 2011, se seleccionaron las siguientes estaciones para el análisis: Usaquén, Carvajal, Suba, Guaymaral, Fontibón, Puente Aranda, Ferias, Simón Bolívar, Kennedy y Tunal. Por otro lado, las estaciones: Cazucá, Central de Mezclas, Chico, Engativa, Olaya, Universidad nacional, Olaya, Sagrado Corazón y Universidad Nacional no se tuvieron en cuenta para el análisis dada la insuficiente información que manejaban para el periodo seleccionado, al mismo tiempo, no estaban activas para el año 2011. El resumen de su información se muestra en el gráfico resumen de datos el cual se encuentra en el anexo.

Se seleccionó 2008 como año inicial para el análisis, año cuando se observó que se comenzaba a presentar regularidad en la información de la concentración de contaminantes. La figura 13-3, por ejemplo, muestra la regularización de la información para las concentraciones de  $PM_{10}$ , CO y  $O_3$  en la estación de Puente Aranda a partir de 2008.

### **3.2.2 Segundo Criterio: Análisis de los valores del porcentaje de captura para la concentración de los contaminantes para las 10 estaciones seleccionadas para el período 2008-2011**

La tabla 10-3 muestra el Porcentaje de captura por año para la concentración de  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NO_2$ , CO,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  en las estaciones de la RMCAB para el período 2008-2011.

El criterio del porcentaje de captura permitió dar un concepto de calidad para los datos procesados por las estaciones, así como, identificar y seleccionar para cada estación los años en que el porcentaje de captura de la concentración de los contaminantes era superior al 75%. De acuerdo con esto, se realizaron las siguientes observaciones:

- El año con porcentajes de captura mayor al 75% fue 2010 con un 80% de datos aprovechables seguido del 2011 con 72% y 2009 con 63% el más bajo fue el 2008 con un valor de 30%.
- Ninguna estación cumplió para todos los años del período con todos los contaminantes por encima del 75%.
- Con excepción de la estación de Simón Bolívar, ninguna de las otras estaciones registran todos los contaminantes.
- Para el período de los 4 años, se encontró que la estación de Fontibón fue la de mayor cantidad de información aprovechable para el análisis (mayor número de datos con porcentaje de captura mayor del 75%), con 80%, seguida de Simón Bolívar y Carvajal, con un 70% aproximadamente, y Ferias con un 65 %- Las demás tuvieron un porcentaje entre 50 y 60%. Las estaciones de Kennedy, Puente Aranda y Tunal , que son estaciones ubicadas en áreas de alta concentración de contaminantes, presentan valores bajos en la cantidad de datos aprovechables; Puente Aranda tiene cerca de 65%, Kennedy y Tunal, cerca de 45%

- El PM<sub>10</sub> tuvo el mejor porcentaje de captura, con cerca de 80%, seguido de O<sub>3</sub> y CO, con 69%. Los valores más bajos corresponden al PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, con 38%, 42% y 50%, respectivamente, lo cual se asocia a un desempeño pobre para una red de monitoreo de calidad del aire.

**Tabla 10-3:** Porcentaje de captura para SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> en las estaciones de la RMCAB para el período 2008-2011. Se resaltan en color verde las que tienen un valor mayor o igual al 75%

	2008						2009					
Estación	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO
Carvajal	74.7	41.5	54,1		79.2	41.9	95.9	91.7	97,0		90.7	92.6
Kennedy		15.9	75.1	53,5	66.7	14.4		0	85.9	69,2	85.9	60.9
Fontibón	81.6	79	54,9		53,2	91,1	83.6	76.1	89,6		58,8	75
Puente Aranda	53.2	68.6	54,0		79.8	59.3	92.7	90.5	96,1		70.4	91.9
Tunal	32.2	42.4	39,5		71.7	0	68	57	95,4		72.6	54.2
Simón Bolívar	96.8	77.6	93,5	55,0	97.5	95.8	87.3	78	94,2	71,0	85.7	94.2
Ferias	63.9	70.8	48,6		39.2	94.5	88.2	64.6	95,7		65.4	93.9
Suba			77,9		37.9		92.3	46.1	83,4		71.4	
Usaquén	18.7		73.3			0	87.4		74,7			0
Guaymaral	59.4	61	88.7				92.4	72.7	92,2			
	2010						2011					
Estación	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO
Carvajal	82.8	84.3	94.5		33.7	93.7	93.3	38.8	96,1		87.3	96.9
Kennedy		71.7	94.6	81.9	82	95		81.4	85	83,9	39,8	84.3
Fontibón	81.7	63.5	90.1		83.6	80.8	79.7	72.5	84,8		81,6	76,8
Puente Aranda	46.4	93.7	95.8		93.8	91.8	89.7	17.4	95,2		96.4	97.3
Tunal	79.5	79.5	94,6		61.1	92.8	90.1	94.6	98,1		74.4	88
Simón Bolívar	83.7	92.9	94,5	87.6	83.8	93.1	65.8	72	92,7	0,0	57.6	66.9
Ferias	91.6	83.5	96.8		65.4	85.4	89.6	96.2	96,6		95.6	96.3
Suba	82.3	96.7	94.2		75.9		90	74.2	90,8		92.7	
Usaquén	85.8		90.5			31.6	82.4		45,3			88.4
Guaymaral	62.5	68.8	91.8				87.6	65.7	93.8			



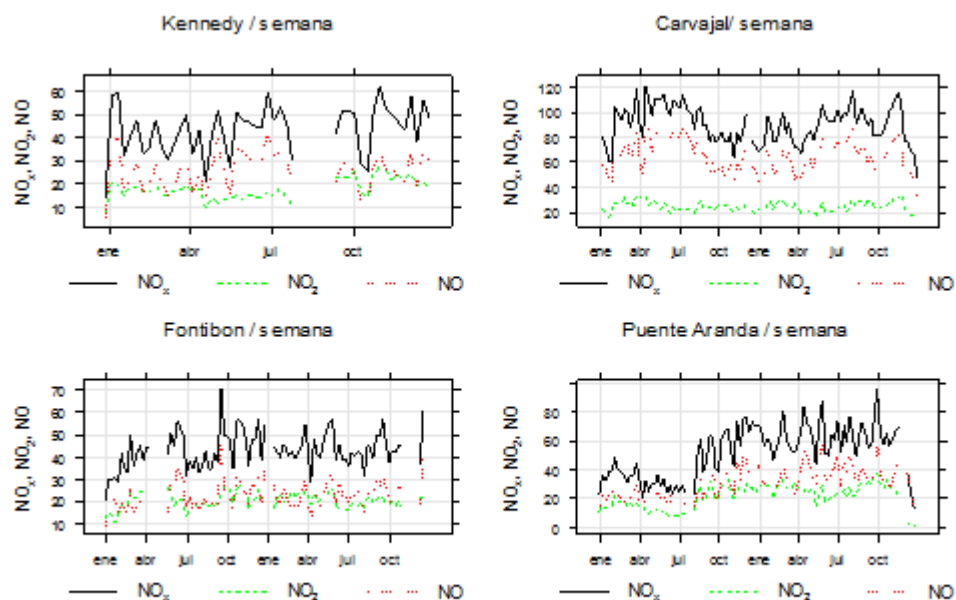
El criterio de porcentaje de captura del 75% se tuvo en cuenta para seleccionar los períodos de cada contaminante a ser analizados en cada estación. La selección se hace más difícil al estudiar las relaciones entre pares de contaminantes, pues en el período de análisis ambos contaminantes deben tener un porcentaje de captura superior al 75%. Finalmente, debido al bajo porcentaje de captura del año 2008, tan sólo 30%, se tomó la decisión de seleccionar el período 2009-2011 para los análisis de la información de la RMCAB de este trabajo.

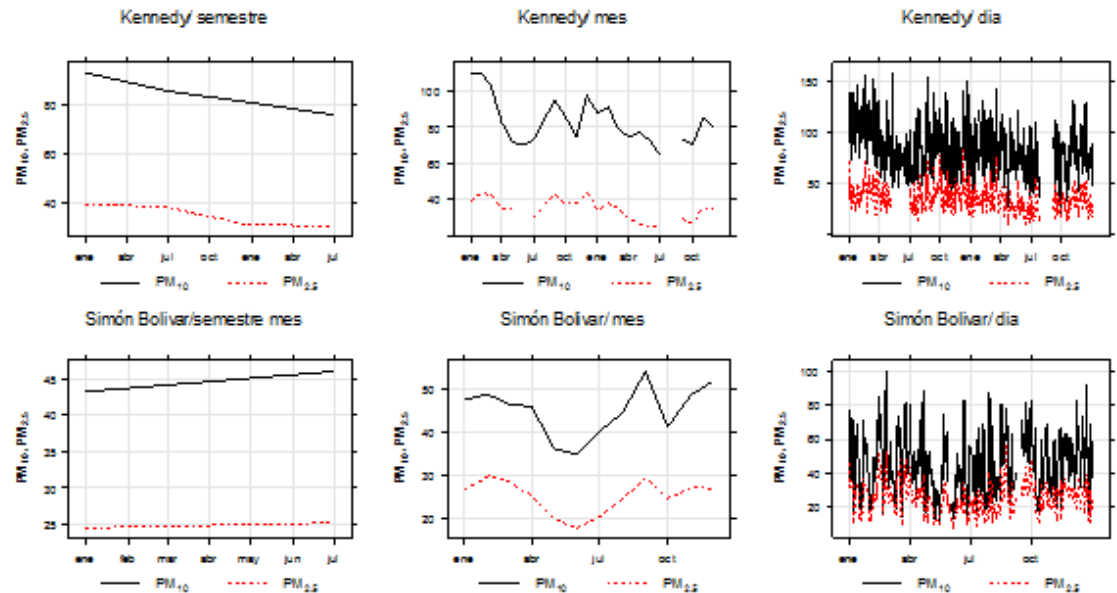
Por otra parte, para la estación de Tunal, dado que, es una estación importante en el análisis de calidad del aire y que no se tenía ningún año con valores concentración de  $\text{SO}_2$  con porcentaje de captura superior al 75%, se decidió trabajar con los datos de 2011, con un porcentaje de captura de 74,4%.

### 3.2.3 Tercer Criterio: Verificación de las recomendaciones de la Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA existentes en Colombia – GPVD (IDEAM, 2011)

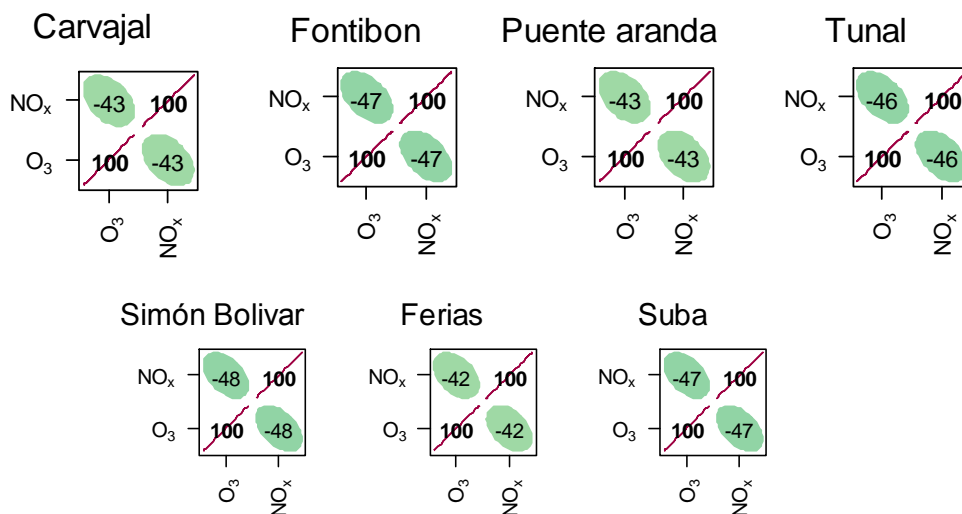
La GPVD del IDEAM permitió generar un análisis en dos sentidos: datos físicamente imposibles y relación entre contaminantes. Las figuras 14-3 y 15-3 muestran que la información de óxidos de nitrógeno y material particulado en las estaciones seleccionadas y el período seleccionado no presentó incongruencias con respecto a que valores de  $\text{NO}_x$  y  $\text{PM}_{10}$  siempre fueron superiores a  $\text{NO}_2$  o  $\text{NO}$  y a  $\text{PM}_{2.5}$ , respectivamente.

**Figura 14-3:** Comportamiento de la concentración de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$  en estaciones de la RMCAB



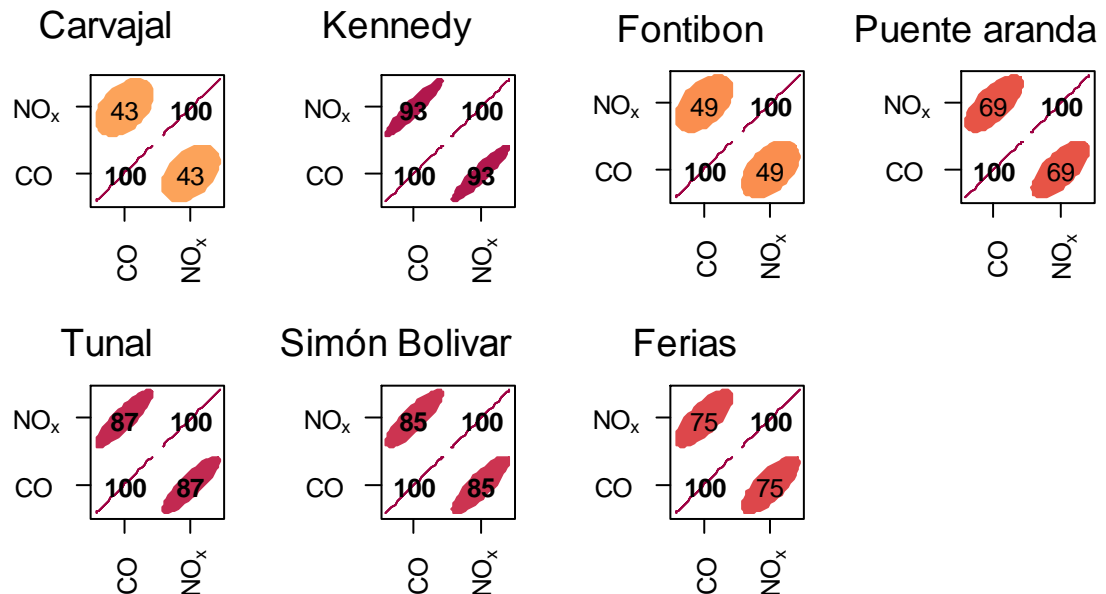
**Figura 15-3:** Comportamiento de la concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  estaciones de la RMCAB

Las figuras 16-3 a 18-3 muestran los coeficientes de correlación  $r$  para las parejas de contaminantes:  $NO_2$ - $O_3$ ,  $CO$ - $NO_x$  y  $SO_2$ - $PM_{10}$ . En cada gráfico se indica el signo y las dos primeras cifras decimales del coeficiente de correlación de Pearson  $r$ . Por ejemplo, -43 representa -0,43. Se observa en la figura 16-3 que la correlación entre  $NO_x$  y  $O_3$  es negativa en todas las estaciones, es decir, que a medida que un contaminante aumenta, el otro disminuye, lo cual se espera en el caso de estos contaminantes (IDEAM, 2011).

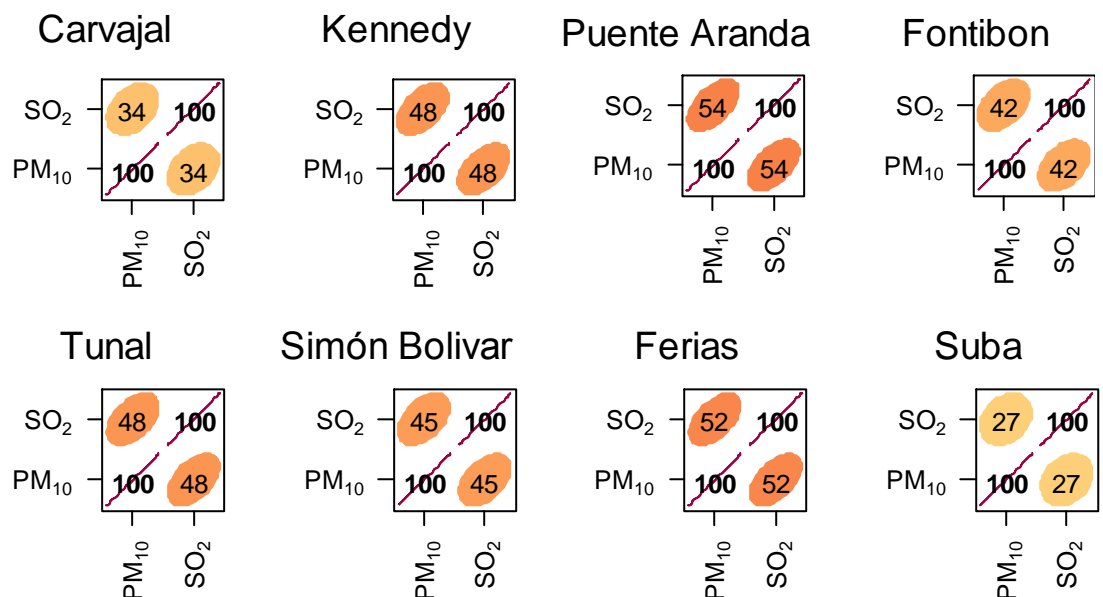
**Figura 16-3:** Diagrama de correlación para  $NO_x$  y  $O_3$  estaciones RMCAB

Las figuras 17-3 y 18-3 muestran un valor positivo para el coeficiente  $r$  tanto para la relación entre CO y  $\text{NO}_x$ , como en la relación entre  $\text{SO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$  en las estaciones seleccionadas, coincidiendo también con lo esperado (IDEAM, 2011).

**Figura 17-3:** Diagrama de correlación para CO y  $\text{NO}_x$  estaciones RMCAB



**Figura 18-3:** Diagrama de correlación para  $\text{SO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$  estaciones RMCAB



Con el mismo propósito, a los criterios de depuración aplicados a la información de la RMCAB, se empleó la función *min.bin*, que permite filtrar datos atípicos.

### **3.3 Tercera fase. Análisis de la información depurada y generación de conocimiento adicional sobre la calidad del aire en Bogotá mediante Openair**

La aplicación Openair cuenta actualmente con 17 herramientas que pueden ser empleadas para el análisis de la información de la RMCAB. Algunas de estas herramientas generan resultados similares, (Tabla 5-1). De todas las herramientas, la gráfica polar es una de las más frecuentemente usadas para el estudio de localización de fuentes emisoras, dado que relaciona la concentración de contaminantes con la velocidad y la dirección del viento.

Para el análisis y depuración de la información de la RMCAB, se emplearon las herramientas resumen de datos, matriz de correlación y función de variación temporal. Para el análisis de las fuentes de contaminación, se emplearon las funciones rosa de los vientos, temporal anular y gráfico polar.

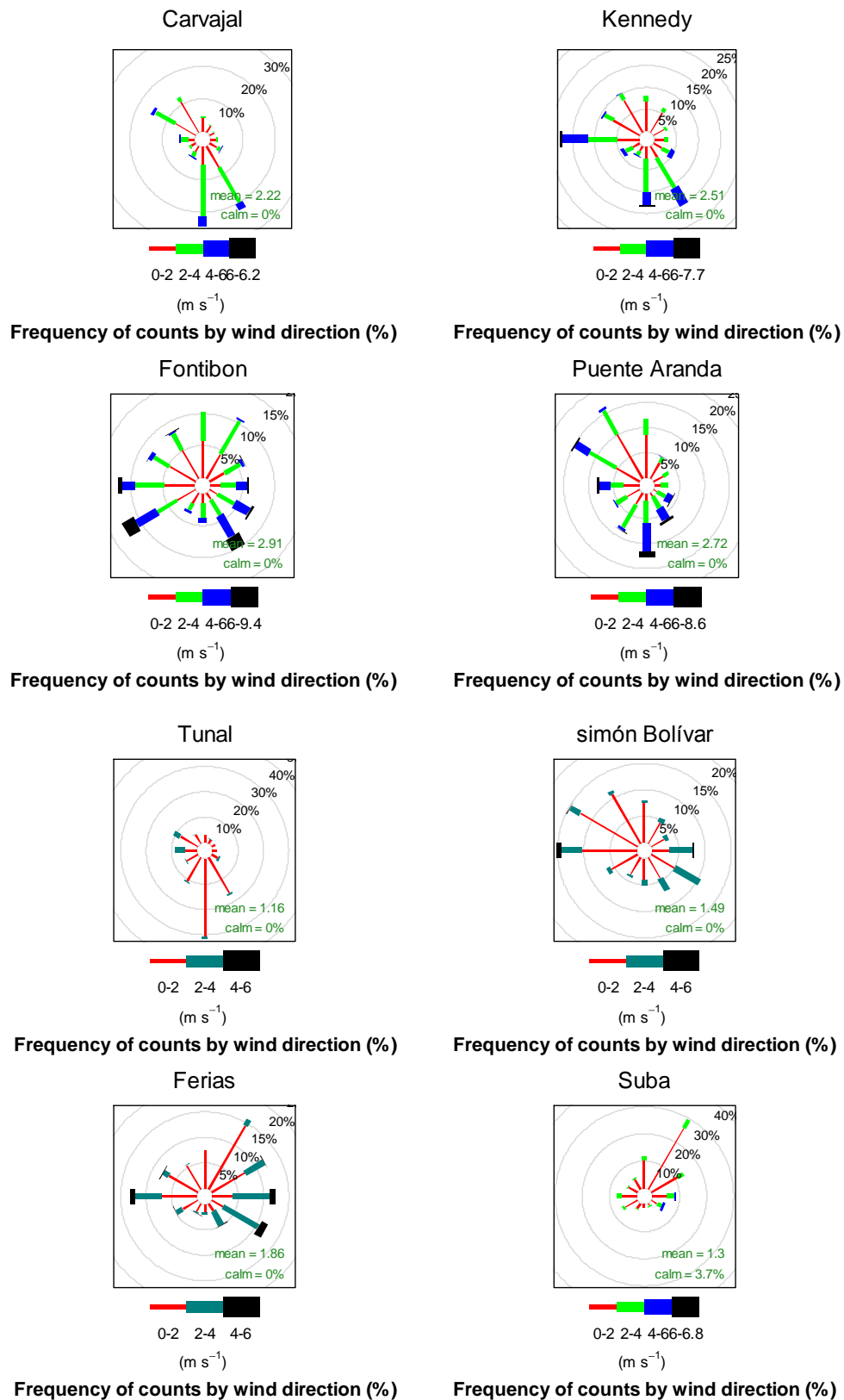
El proceso de análisis de los datos de la RMCAB con Openair generó un importante número de gráficas. Se presenta sólo una muestra de ellas en el texto principal de este trabajo, con el fin de facilitar el análisis. La totalidad de las gráficas se muestra en anexos.

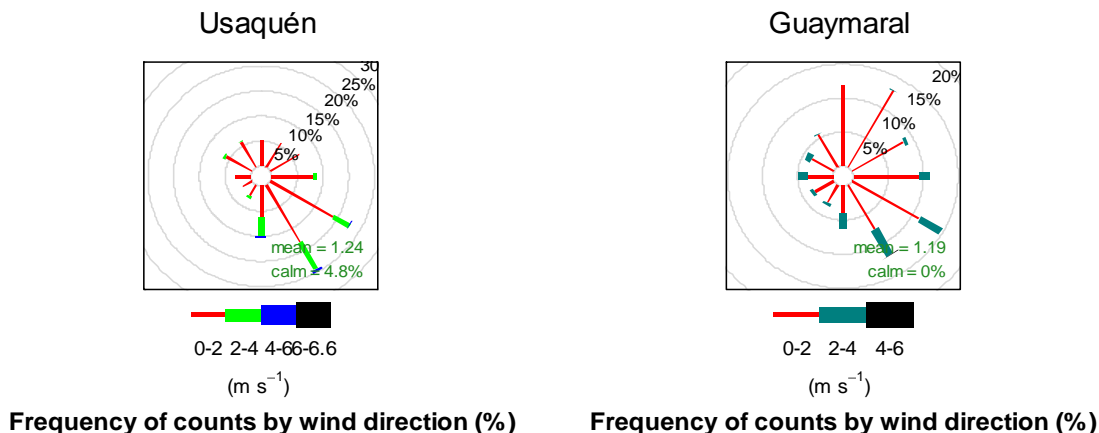
#### **3.3.1 Rosas de vientos**

Las rosas de vientos muestran la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección del viento, de manera que permite identificar si existen algunas direcciones predominantes y cuáles son las velocidades en dichas direcciones. Si la dirección predominante del viento coincide con fuentes emisoras significativas, entonces existe alta probabilidad de que los contaminantes emitidos por ellas sean transportados hasta la estación de monitoreo receptora.

La figura 19-3 muestra la rosa de los vientos para el período 2009-2011 para cada una de las 10 estaciones analizadas. En esta se observa, por ejemplo, como las direcciones predominantes y las mayores velocidades de los vientos para las estaciones de Carvajal, Kennedy son sur-sureste presentando una frecuencia aproximada de 40 % y 30% respectivamente. Igualmente, estas dos estaciones presentan valores importantes de frecuencia en la dirección oeste-noroeste. Por otra parte, las estaciones de Puente Aranda y Fontibón también presentan frecuencias por encima del 15% en las direcciones anteriores, aun cuando también lo tienen en otras, sobre todo la estación de Fontibón que parece recibir influencia de vientos en casi todas las direcciones.

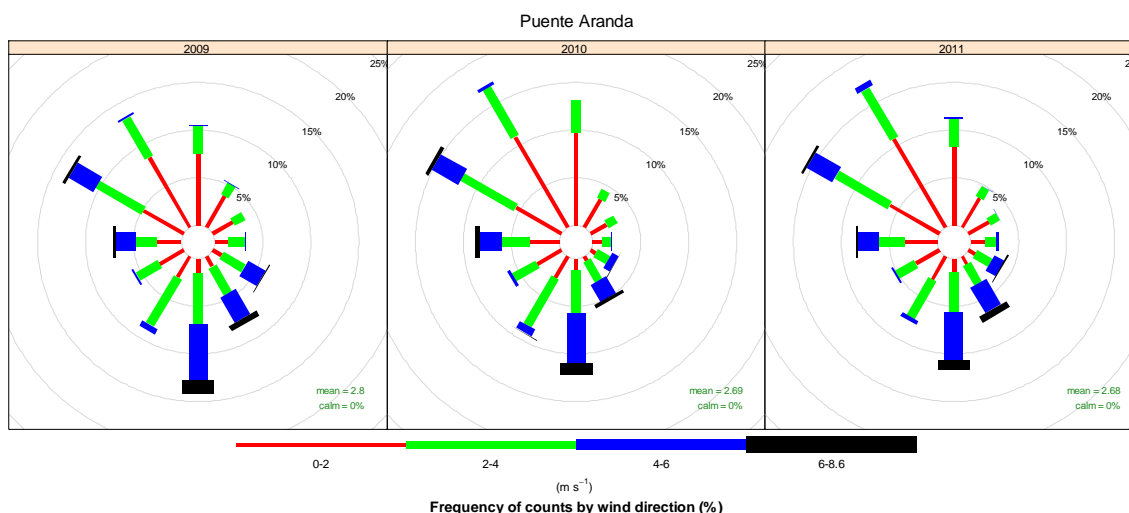
**Figura 19-3:** Rosa de los vientos para el período 2009-2011 estaciones RMCAB





La figura 20a-3 muestra la rosa de los vientos para la estación de Puente Aranda. En cada uno de los 4 años, los vientos provenientes de las direcciones oeste-noroeste y norte-noroeste son los más frecuentes, con velocidades inferiores a 4m/s en su mayor parte. El viento proveniente del sur es el tercero en frecuencia, aunque ocurre a velocidades entre 4 y 6 m/s con mayor frecuencia, de manera que podría transportar contaminantes generados a mayor distancia de esta dirección. La distribución de frecuencias es muy similar para periodos anuales entre 2009 y 2011. Las gráficas de la otras estaciones se encuentran en los anexos.

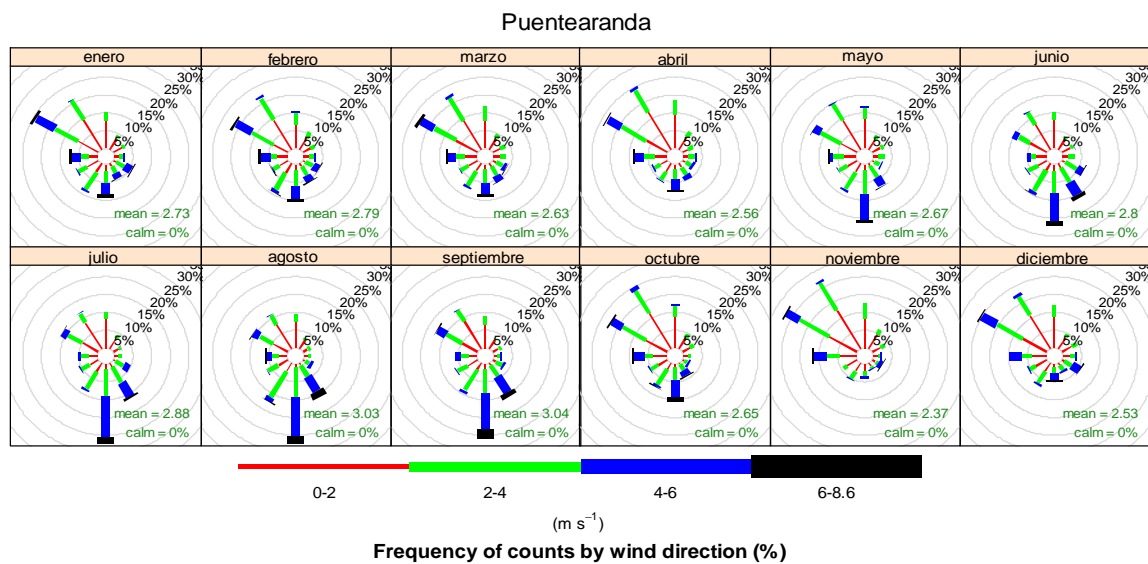
**Figura 20a-3:** Rosa de los vientos para periodos anuales entre 2009 y 2011 en la estación Puente Aranda



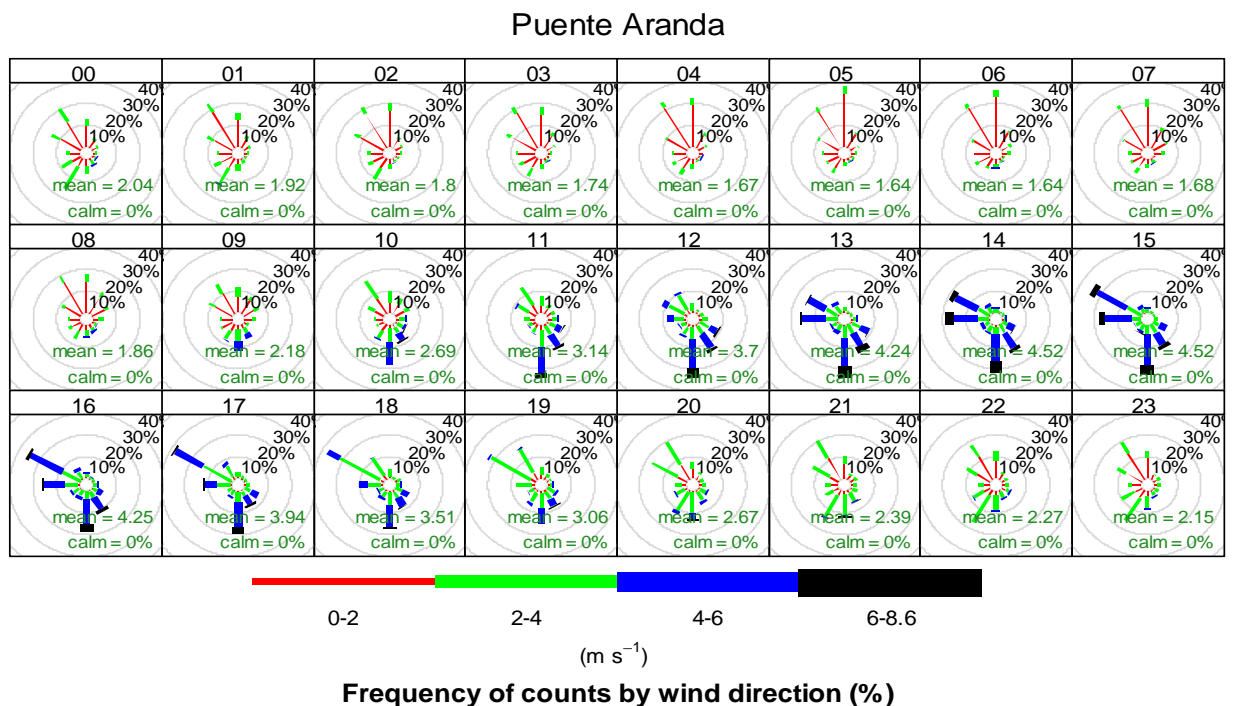
Las figuras 20b-3 y 20c-3 muestran las rosas de vientos para periodos mensuales y horarios en la estación de Puente Aranda. Los vientos de la dirección noroeste tienen mayor prevalencia en el

primer y el último trimestre del año. En el segundo y tercer trimestres se observa una predominancia de los vientos del sur con velocidades entre 4 y 6m/s. En la escala horaria, se observa claramente el cambio de velocidades entre la noche y el día.

**Figura 20b-3:** Rosa de los vientos para periodos mensuales entre 2009 y 2011 en la estación Puente Aranda



**Figura 20c-3:** Rosa de los vientos para periodos horarios entre 2009 y 2011 en la estación Puente Aranda



### 3.3.2 Análisis de la concentración de PM<sub>10</sub>

La figura 21-3 muestra el gráfico polar para las concentraciones de PM<sub>10</sub> medido en las estaciones de la RMCAB para el período 2009 – 2011. Los valores de las máximas concentraciones para este contaminante fueron más altos para 2010 que para 2009 y 2011, en la mayoría de las estaciones. Los valores más altos de la concentración se presentan con viento de baja velocidad y con vientos que proceden principalmente de la dirección oeste con velocidades superiores a 5 m/s. En la estación Carvajal, se presentan valores altos de concentración de PM<sub>10</sub> con vientos que llegan con dirección sur-suroeste/sur-sureste.

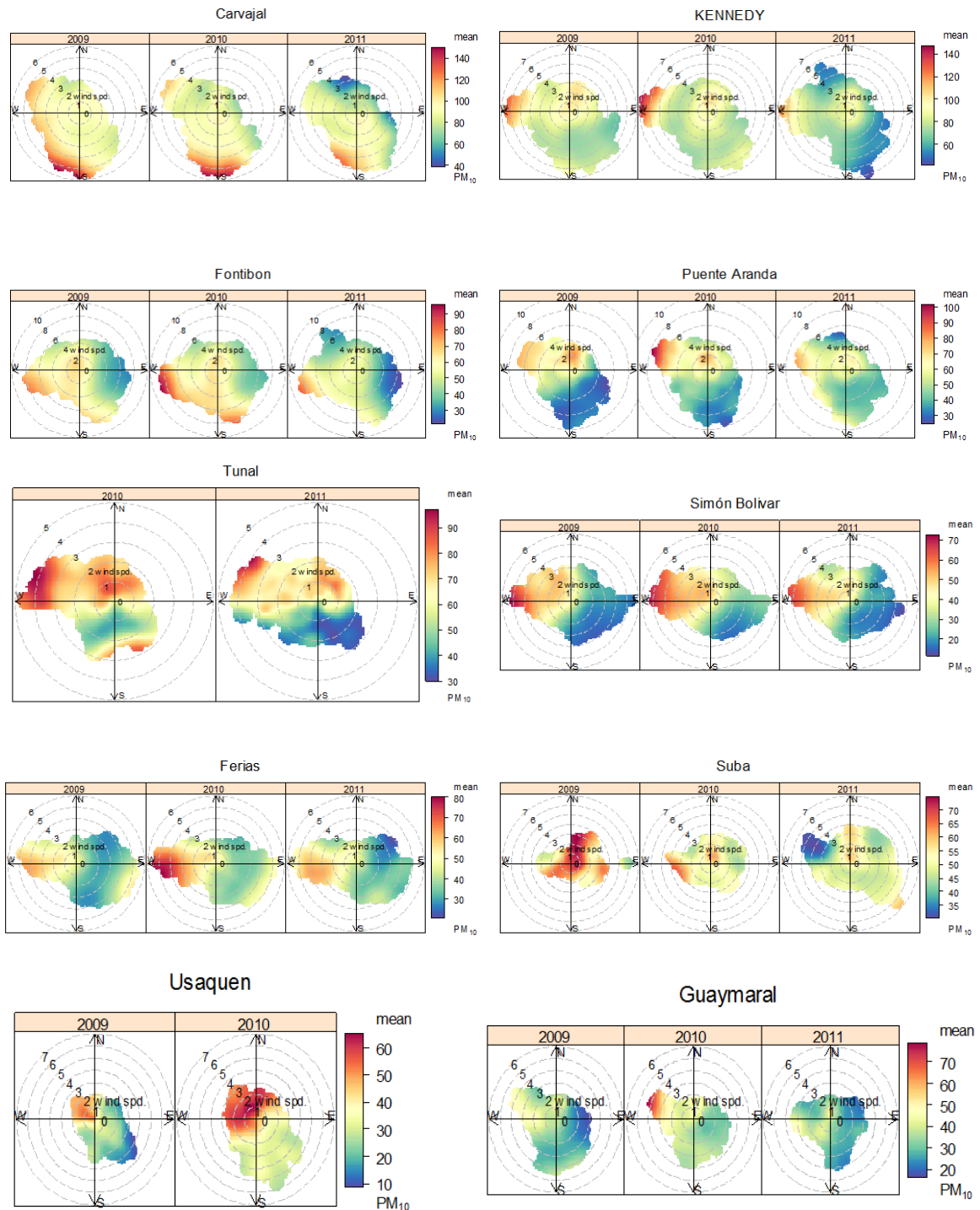
Los valores altos de la concentración cuando los vientos están en calma para las estaciones de Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda y Tunal, muestran una influencia importante de fuentes, tanto industriales como móviles, cercanas a estas estaciones, como es de esperarse en zonas con un número elevado de industrias y/o alto flujo vehicular. Las estaciones de Kennedy y Carvajal reportan concentraciones de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Fontibón, Puente Aranda y Tunal 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , aproximadamente, por influencia local. Sin embargo, se presentan valores más elevados, entre 120 y 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , cuando el viento llega con velocidades por encima de 5 m/s, del oeste para la estación Kennedy y del sur para la estación Carvajal. De manera similar, los valores máximos son del orden de 80 a 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para Puente Aranda y Tunal, en las direcciones oeste y oeste-noroeste. Altas concentraciones también son registradas en Tunal con vientos del norte a velocidades bajas.

Las estaciones de Simón Bolívar y Ferias presentan los máximos valores de concentración entre 60 y 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con vientos que proceden del oeste y en todo el rango de velocidades por debajo de 5 m/s. Es claro que los vientos procedentes del oeste están asociados a altas concentraciones de PM<sub>10</sub> en estas estaciones centrales de la ciudad, lo cual indica una influencia de la contaminación generada al occidente de la ciudad.

En Usaquén se registran valores máximos entre 50 y 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para vientos que llegan en las direcciones entre oeste y norte, en todo el rango de velocidades por debajo de 4 m/s. Para las estaciones de Suba y Guaymaral, no se observa una condición repetida en los 3 años del período. Los máximos de concentración en la estación de Suba están asociados a bajas velocidades en la dirección norte y norte-noreste, indicando una posible influencia de fuentes muy cercanas en dichas direcciones. En la estación Guaymaral, puede identificarse la asociación entre las concentraciones máximas y vientos del oeste y oeste-noroeste a velocidades cercanas a 4 m/s.



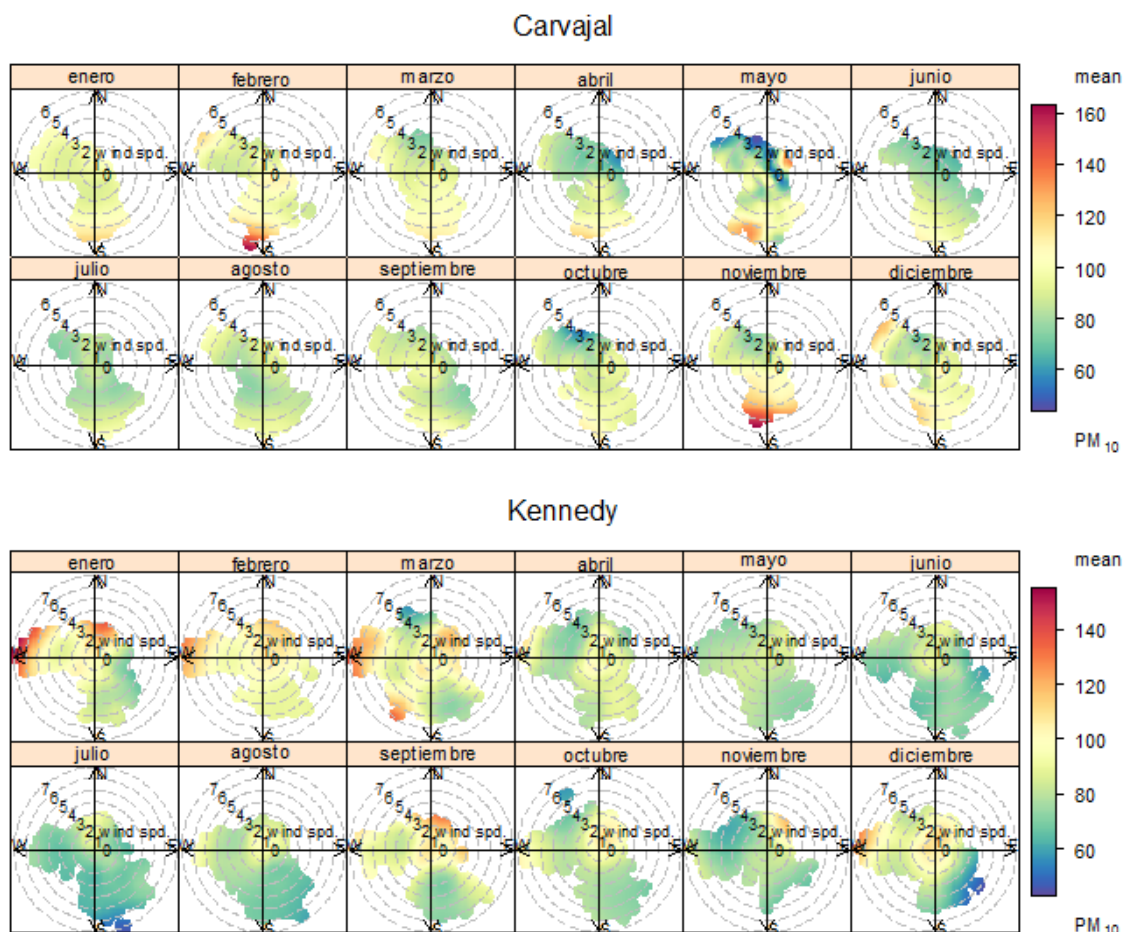
**Figura 21-3:** Gráfico polar de la concentración de  $PM_{10}$  para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB.

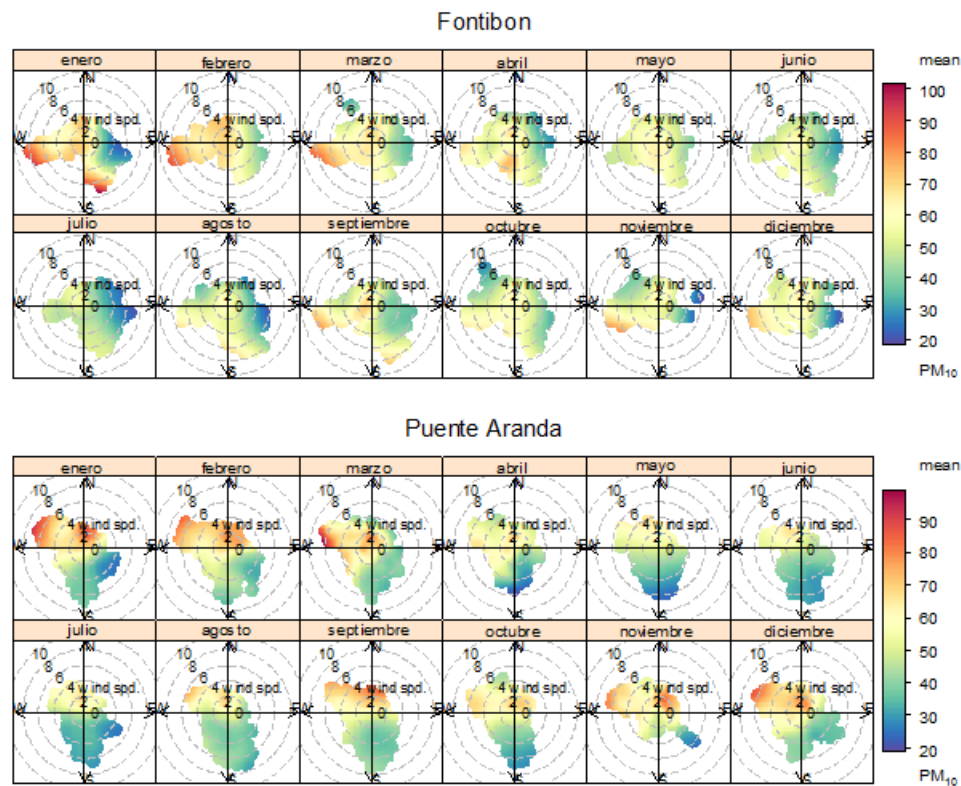


En la figura 22-3 se puede observar las concentraciones máximas de  $PM_{10}$  para cada uno de los meses del año para las estaciones de Kennedy y Carvajal. Se observa que se presenta variación en estos valores a lo largo del año. En general, se encuentran los mayores valores en el primer trimestre y al final del año, en especial cuando se presentan vientos de alta velocidad provenientes del oeste. Los valores de las máximas concentraciones registradas con vientos en calma (influencia de fuentes locales) no muestran variaciones significativas a lo largo del año. Un resultado similar se obtiene a partir de la observación de las gráficas polares de  $PM_{10}$  de las estaciones de Puente Aranda, Fontibón y Tunal (gráficas no mostradas en el cuerpo principal de este documento). Adicionalmente, se observa que la estación de Carvajal, en particular, presenta valores muy altos, entre 100 y 140  $\mu g/m^3$ , cuando los vientos provienen del sur, sin cambios importantes a través el año.

En las estaciones de Simón Bolívar, Ferias y Usaquéen las máximas concentraciones no presentan variación importante a lo largo del año.

**Figura 22-3:** Gráfico polar de la concentración de  $PM_{10}$  para periodos mensuales entre 2009 y 2011 de las estaciones de Carvajal, Kennedy, Fontibón Y Puente Aranda RMCAB.

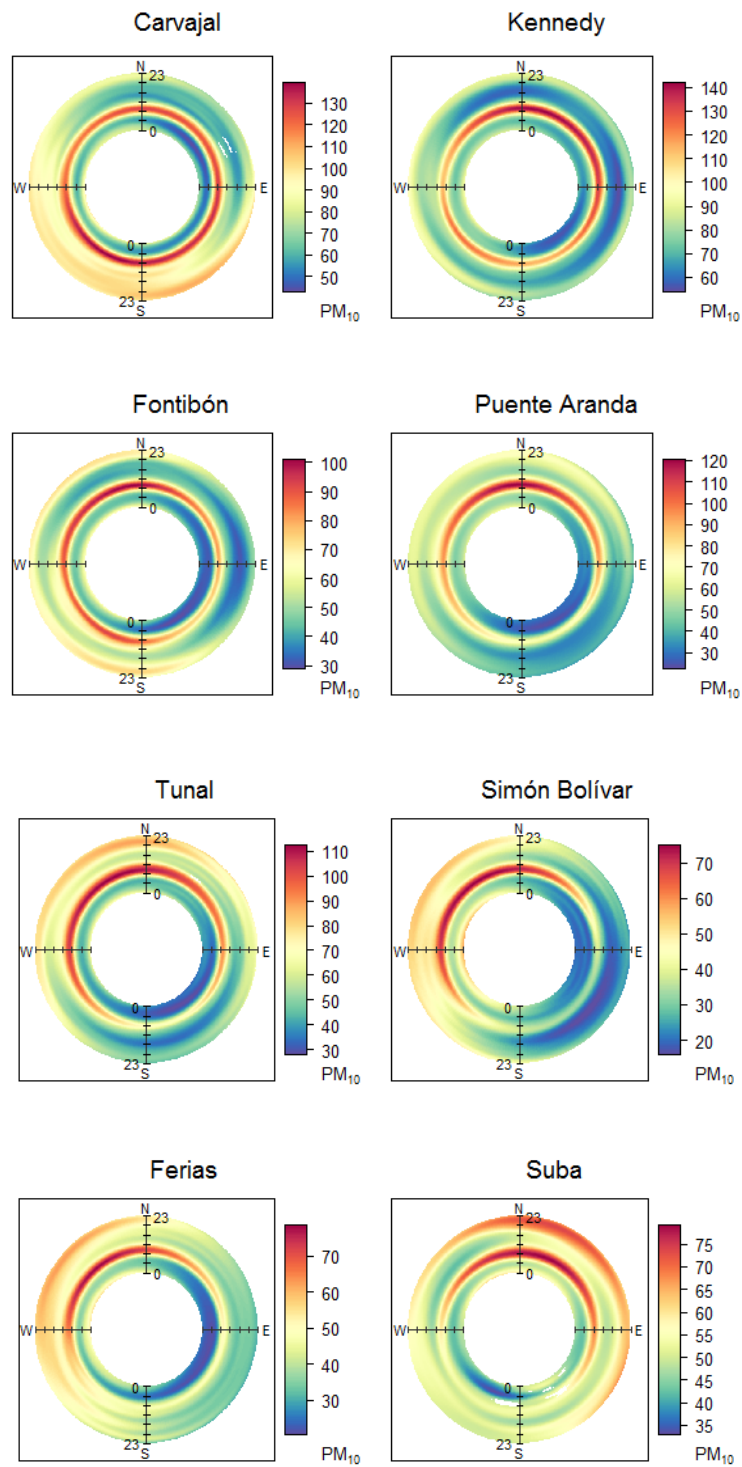


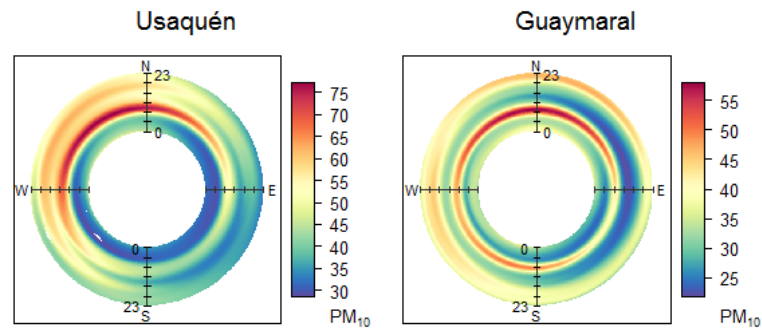


La gráficas polares anulares por hora del día para la concentración de  $PM_{10}$ , figura 23-3, muestran que las concentraciones más altas son observadas entre las 8:00 - 12:00; y llegan de todas las direcciones para Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda y Tunal. La estación Carvajal muestra mayores concentraciones entre las direcciones sur y suroeste para las horas de la tarde. Para la estación Simón Bolívar, las mayores concentraciones se presentan entre las 8:00 y las 12:00, principalmente para vientos de las direcciones comprendidas en el cuadrante norte-oeste y concentraciones relativamente altas en las últimas horas del día en las mismas direcciones. Los vientos en el cuadrante sur-este, en cambio, presentan concentraciones bajas durante casi todo el día. Una situación similar se presenta para la estación Ferias, que es también una estación en la zona central de la ciudad.

En Suba se presentan dos horarios de valores máximos, 8:00 a 12:00 y las horas finales del día, después de las 20:00. Con vientos principalmente del cuadrante norte-este. En Usaquén, las más altas concentraciones se presentan con vientos del cuadrante norte-oeste entre 8:00 y 12:00 y se mantienen en niveles altos durante la tarde. En Guaymaral, las concentraciones más altas ocurren con vientos de casi todas las direcciones en un periodo más corto correspondiente a la hora pico de la mañana, y valores altos de nuevo hacia el final del día.

**Figura 23-3:** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de  $PM_{10}$  por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB.



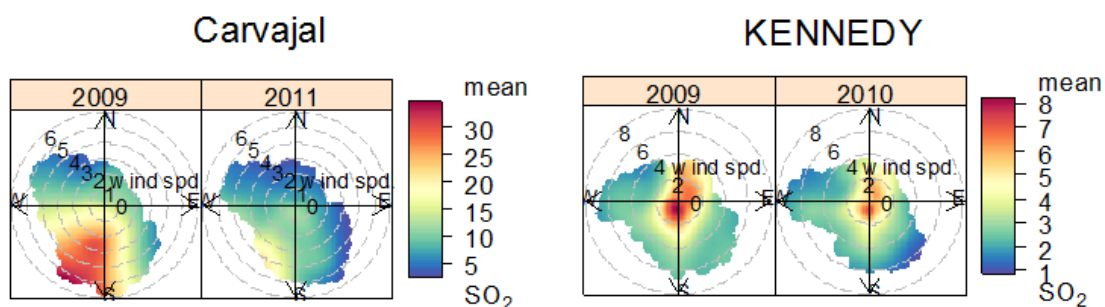


### 3.3.3 Análisis de concentración $\text{SO}_2$

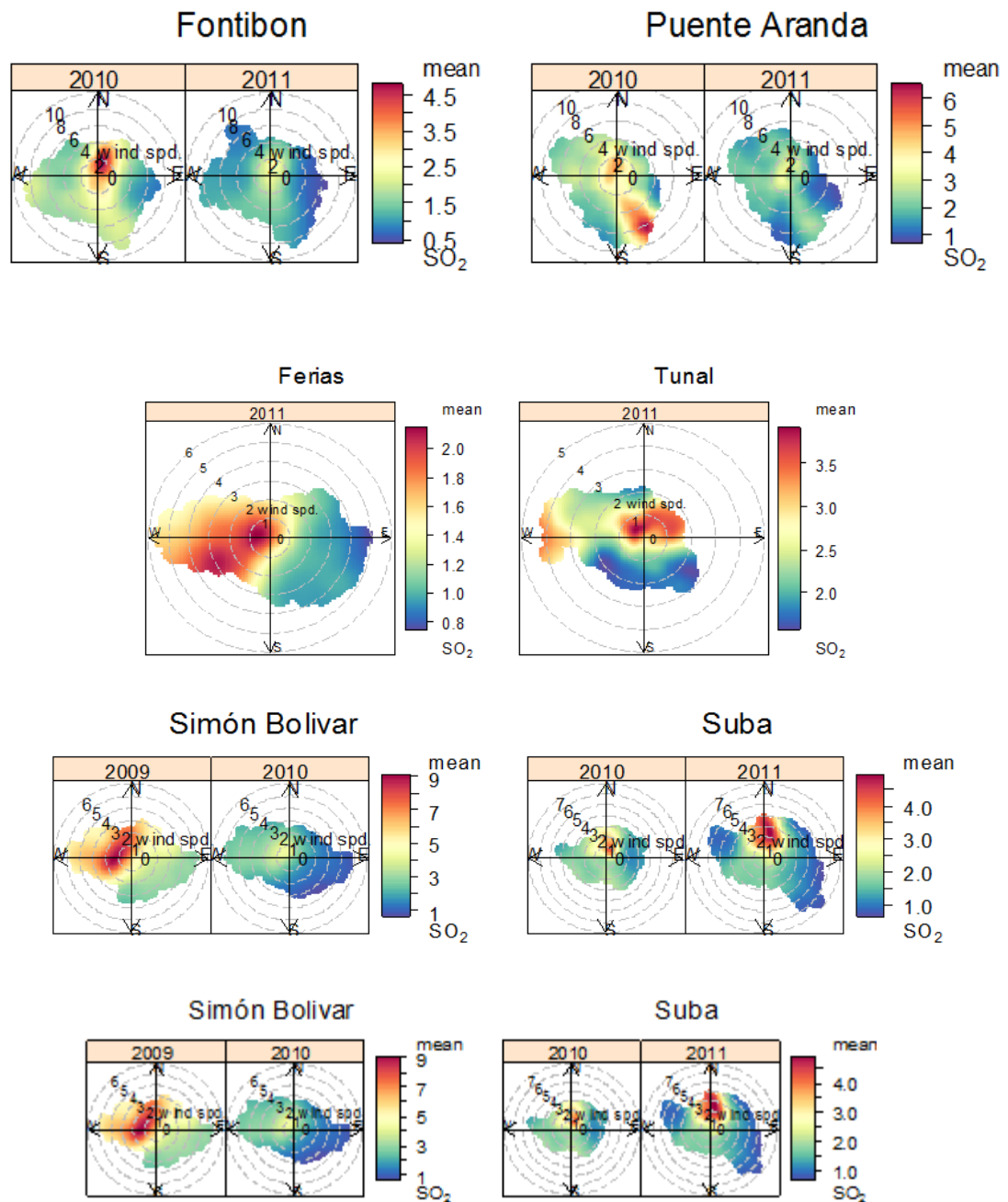
La gráfica polar (figura 24-3) muestra que el valor de las concentraciones máximas de  $\text{SO}_2$  disminuyó en el año 2011 en las estaciones de Carvajal, Fontibón, y Puente Aranda. En las otras estaciones no se pudo evidenciar la disminución por no tenerse la información suficiente. Los valores más altos de concentración de  $\text{SO}_2$  en la estación de Carvajal están asociados con vientos del sur y sureste con velocidades menores de 6 m/s.

En las estaciones Kennedy y Fontibón, los valores máximos están asociados con vientos de baja velocidad y en todas las direcciones. En Puente Aranda, hay una influencia de vientos del sureste, con máximas concentraciones cuando las velocidades de viento están alrededor de 5 m/s. Las estaciones de Simón Bolívar y Ferias tienen sus valores máximos asociados con vientos que provienen del oeste, de manera similar a lo observado para  $\text{PM}_{10}$ , y en todo el rango de velocidad por debajo de 6 m/s. En Suba y Tunal, se presentan máximos valores de  $\text{SO}_2$  con vientos de baja velocidad con direcciones norte y noreste, respectivamente, aunque hay una influencia a altas velocidades del viento proveniente del oeste para Tunal que no se observa en Suba.

**Figura 24-3:** Gráfico polar de la concentración de para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RM CAB.

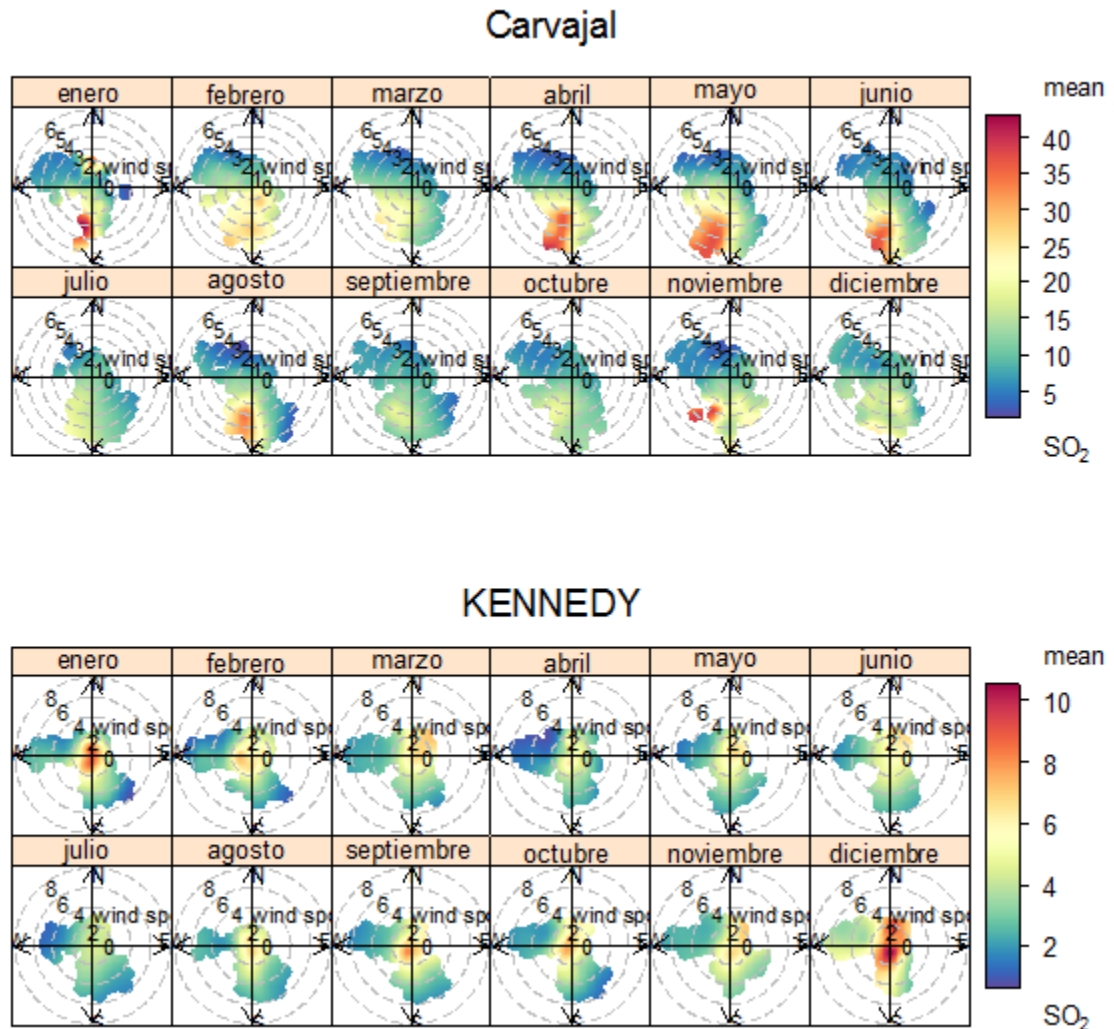






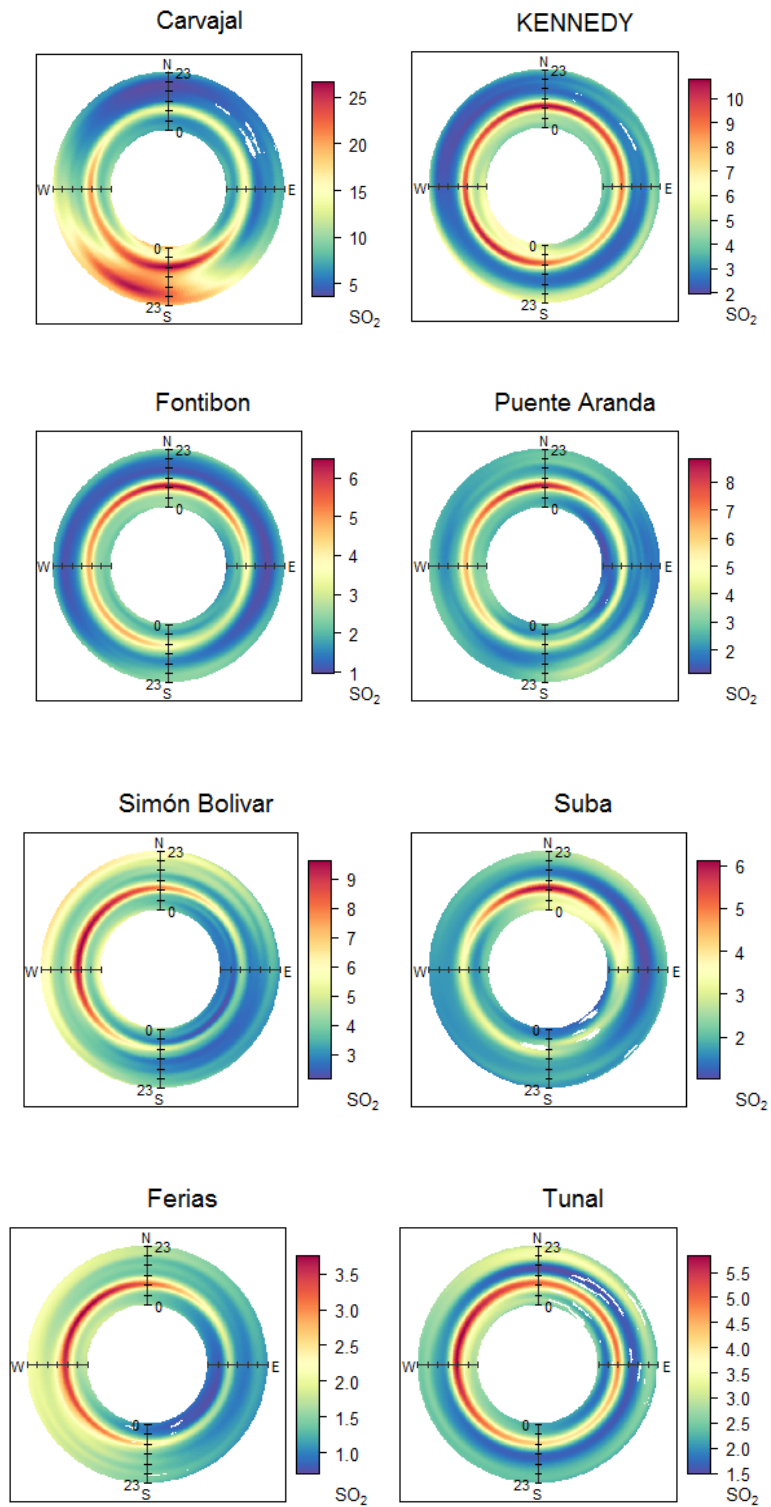
La figura 25-3 muestra, como ejemplo, el gráfico polar de la concentración de SO<sub>2</sub> por meses del año en las estaciones de Carvajal y Kennedy. Las concentraciones máximas en Carvajal se presentan en los meses de enero, abril, mayo, junio, agosto y noviembre, asociadas a vientos procedentes del sur-suroeste con velocidades entre 3 y 6 m/s, indicando la posible influencia de fuentes no locales, pero tampoco muy lejanas. En Kennedy, las concentraciones máximas están asociadas a vientos en calma, mostrando la influencia de fuentes locales durante todo el año, en especial en diciembre y enero. Las otras estaciones mantienen un comportamiento similar.

**Figura 25-3:** Gráfico polar de la concentración de  $\text{SO}_2$  para periodos mensuales entre 2009 y 2011 de las estaciones Carvajal y Kennedy.



Las gráficas polares anulares para la concentración de  $\text{SO}_2$  por hora del día de las estaciones de RMCAB (figura 26-3), muestran que las concentraciones más altas son observadas en todas las estaciones entre las 8:00 y las 12:00 horas; estas concentraciones llegan con vientos en todas las direcciones para la estación de Kennedy. La estación de Carvajal muestra una influencia de los vientos del sur-suroeste durante prácticamente todo el día. Las estaciones de Fontibón, Puente Aranda, Simón Bolívar y Ferias muestran una mayor influencia de los vientos en el cuadrante norte-oeste y sur-oeste sobre las concentraciones de  $\text{SO}_2$ . Finalmente, la estación de Suba muestra una influencia marcada de los vientos procedentes del norte sobre las concentraciones de  $\text{SO}_2$ .

**Figura 26-3:** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de  $\text{SO}_2$  por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB.

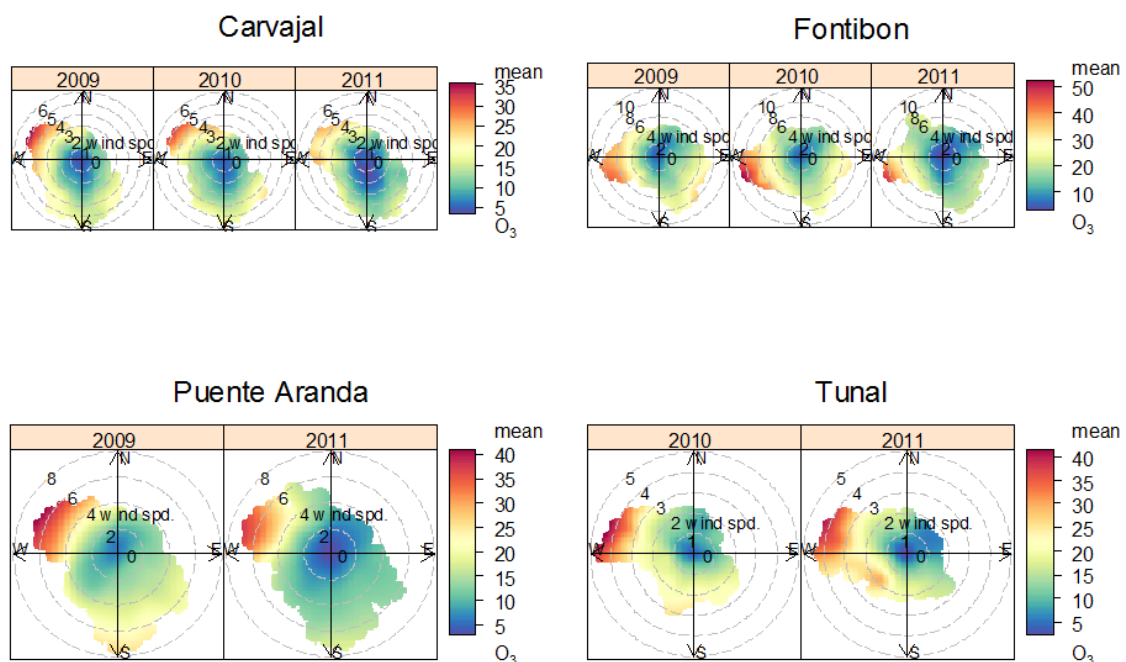


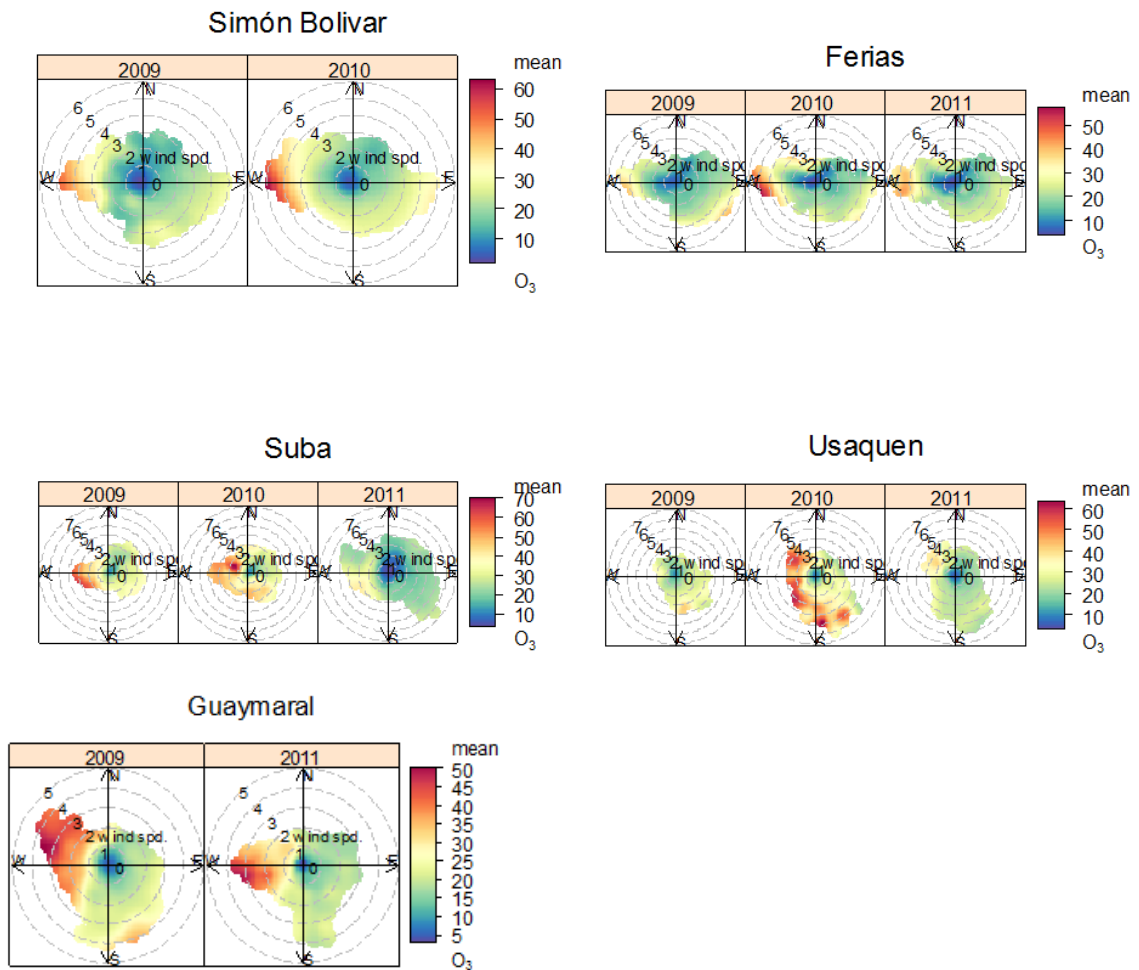


### 3.3.4 Análisis de la concentración de ozono

La figura 27-3 muestra que las mayores concentraciones de ozono se ven asociadas con vientos con velocidades superiores a 5 m/s que llegan con direcciones entre el noroeste y el suroeste para todas las estaciones de la RMCAB. Sólo en Usaquéen se observan concentraciones altas de ozono asociadas a vientos del sur y sureste, además de aquellos del oeste y suroeste. Las concentraciones más bajas de ozono se observan a bajas velocidades del viento. Las bajas concentraciones de ozono resultan principalmente por su reacción con el NO que encuentra en su recorrido. Por lo tanto se esperan menores valores de concentración de ozono en estaciones ubicadas en sectores con altas concentraciones de NO<sub>x</sub>, el cual proporciona NO en exceso, facilitando la reacción del ozono. Lo anterior explicaría por qué las máximas concentraciones de ozono en Carvajal y Puente Aranda son inferiores a las encontradas en Suba, Usaquéen y Guaymaral.

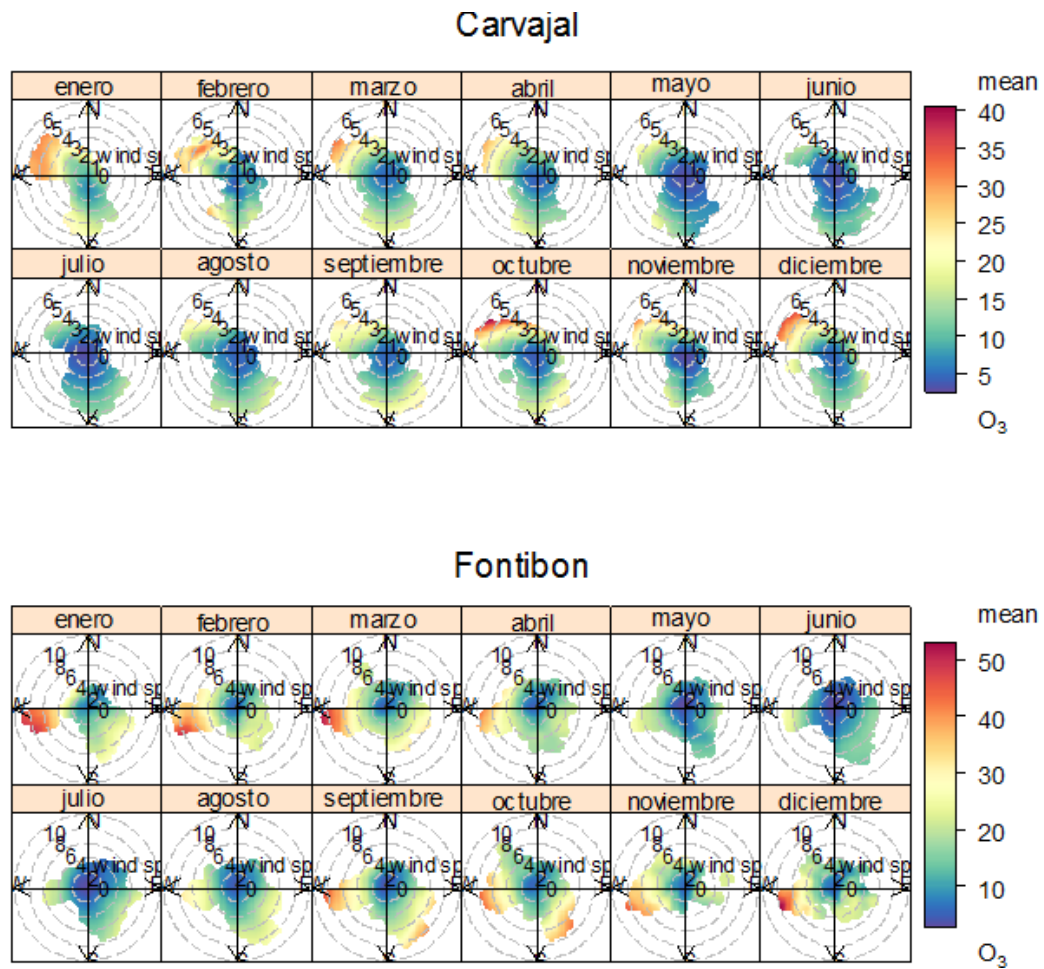
**Figura 27-3:** Gráfico polar concentración de ozono para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB

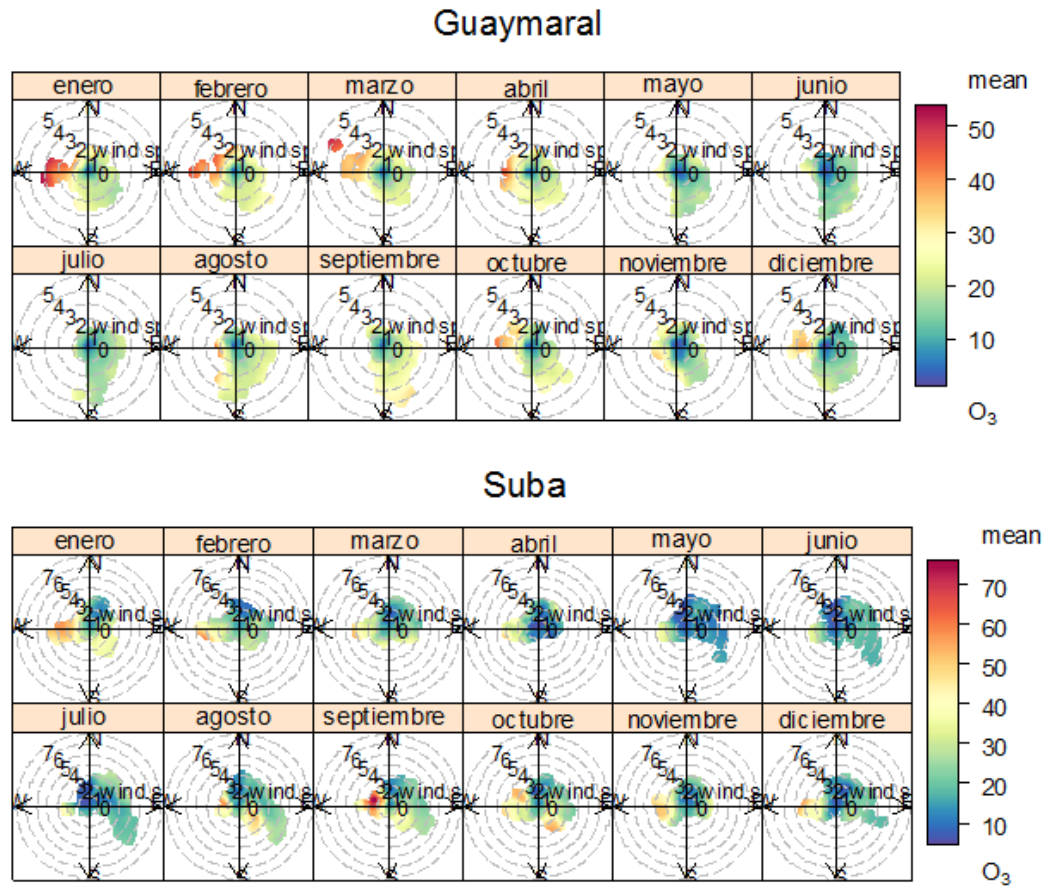




Los mayores valores de concentración de ozono se presentan principalmente en los primeros meses y al final del año; normalmente los meses que registran mayores valores de radiación solar. La figura 28-3 muestra el comportamiento de la concentración del ozono para las estaciones de Carvajal, Fontibón Guaymaral y Suba a lo largo del año. Se observa, por ejemplo, que para las cuatro estaciones mostradas las mayores concentraciones coinciden en los meses de enero, febrero y diciembre y la orientación predominante de estos valores se presenta con vientos que llegan con dirección oeste.

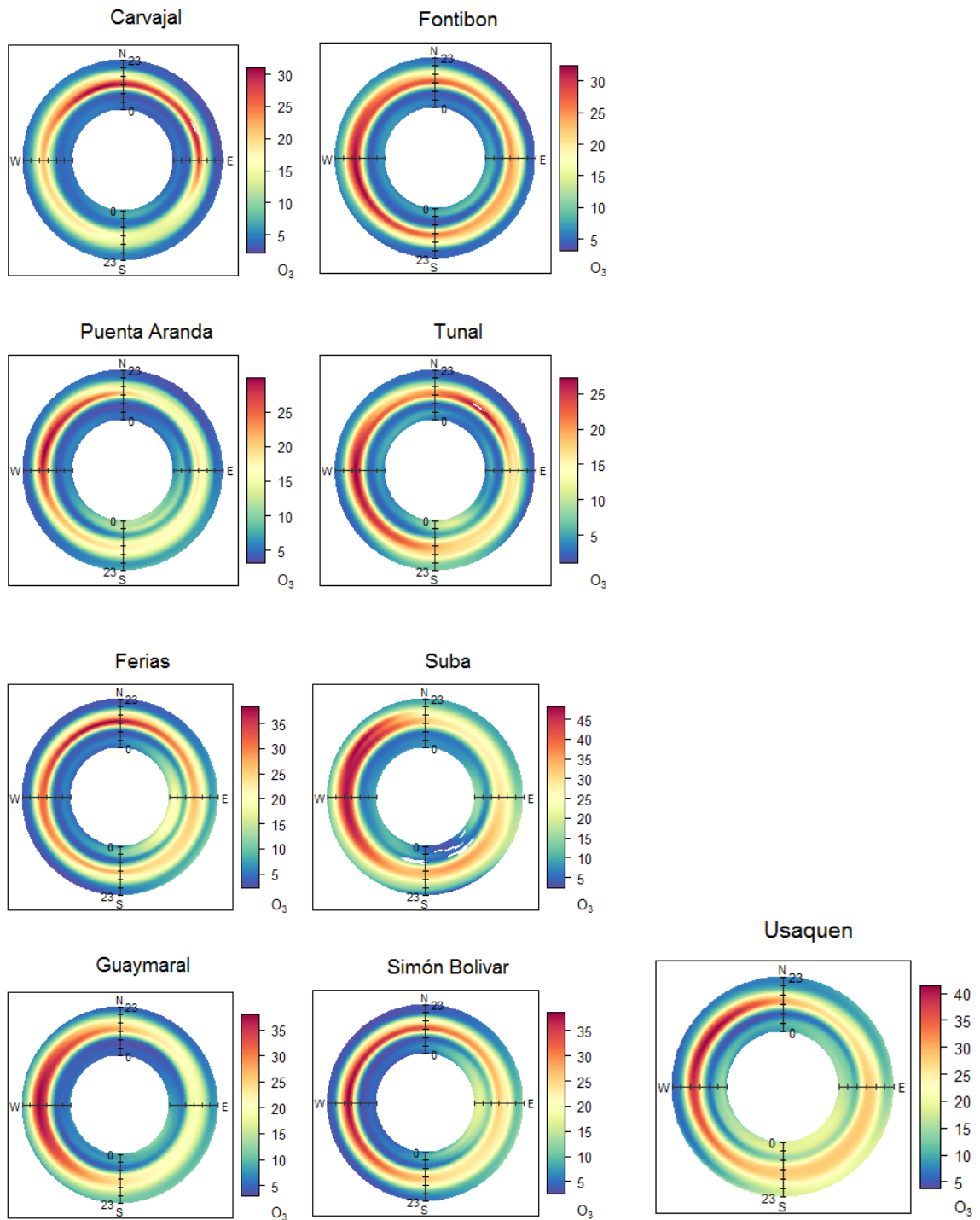
**Figura 28-3:** Gráfico polar concentraciones ozono para periodos mensuales entre 2009 y 2011 estaciones Carvajal, Fontibón, Guaymaral y Suba RM CAB.





La figura 29-3 muestra la variación horaria de la concentración de ozono para las estaciones de la RMCAB. Los mayores valores corresponden a estaciones alejadas de los centros industriales y de alto flujo vehicular, tales como Suba, Usaquén y Guaymaral. Las mayores concentraciones se presentan Los mayores valores de concentración se presentan entre las 12:00 y las 16:00, siendo el pico máximo aproximadamente entre las 14:00, principalmente con vientos del oeste, aunque hay picos de ozono en casi todas las direcciones.

**Figura 29-3:** Gráfico Polar Anular para la variación de la concentración de ozono horaria de la concentración de ozono por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB

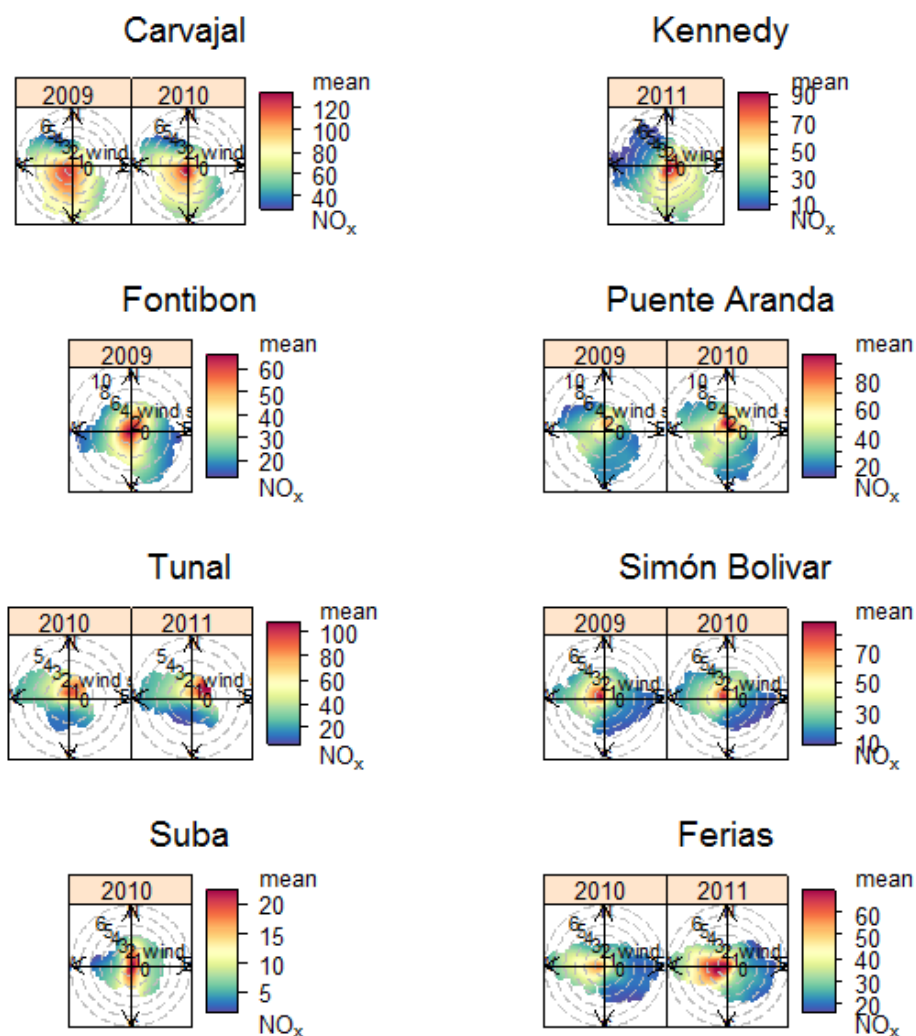


### 3.3.5 Análisis de la concentración de NO<sub>x</sub>

En la figura 30-3 se muestra el gráfico polar de los valores de concentración de NO<sub>x</sub> para las estaciones de la RMCAB. Se observa que las máximas concentraciones de NO<sub>x</sub> se asocian con vientos a baja velocidad, las cuales son consistentes con la emisión de emisiones locales, probablemente de fuentes móviles. Por ejemplo, en la estación de Carvajal, puede registrarse la influencia de la Autopista Sur y la Avenida Boyacá. En la estación de Puente Aranda, la influencia de la Avenida de las Américas, la Calle 13 y la Avenida 68; entre otras.

Un aspecto que se observa en la figura 30-3, es la baja continuidad en la serie de datos para la concentración de NO<sub>x</sub> para las distintas estaciones. En ninguna estación se obtuvieron datos de un período de 3 años para el análisis del comportamiento de este contaminante. Adicionalmente, sólo las estaciones de Ferias y Tunal reportaron los dos últimos años en forma consecutiva.

**Figura 30-3:** Gráfico polar de la concentración de NO<sub>x</sub> para periodos anuales entre 2009 - 2011 estaciones de la RMCAB

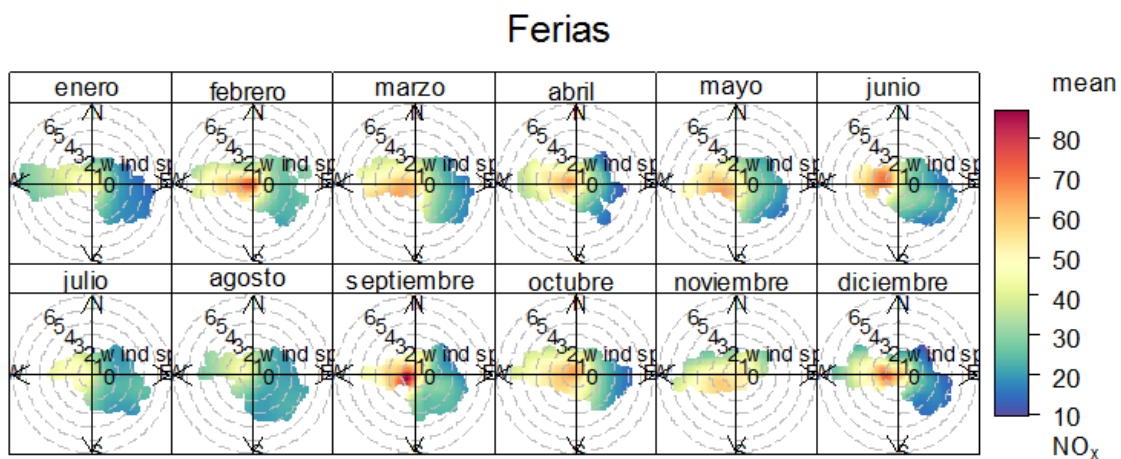




Al observar el comportamiento por mes de las máximas concentraciones de  $\text{NO}_x$  para las estaciones de la RMCAB se encuentra que los mayores valores se presentan aproximadamente constantes para todos los meses del año. La figura 31-3, por ejemplo, muestra que en la estación de Ferias, las máximas concentraciones se presentan con vientos de baja velocidad con dirección predominante oeste, coincidiendo con fuentes móviles que probablemente sea el tráfico automotor que circula por la calle 80. Así mismo, Se observa que el comportamiento de las máximas concentraciones de  $\text{NO}_x$  para esta estación es casi uniforme durante todos los meses del año Ferias. Las demás estaciones muestran un comportamiento similar y se encuentran en el anexo.

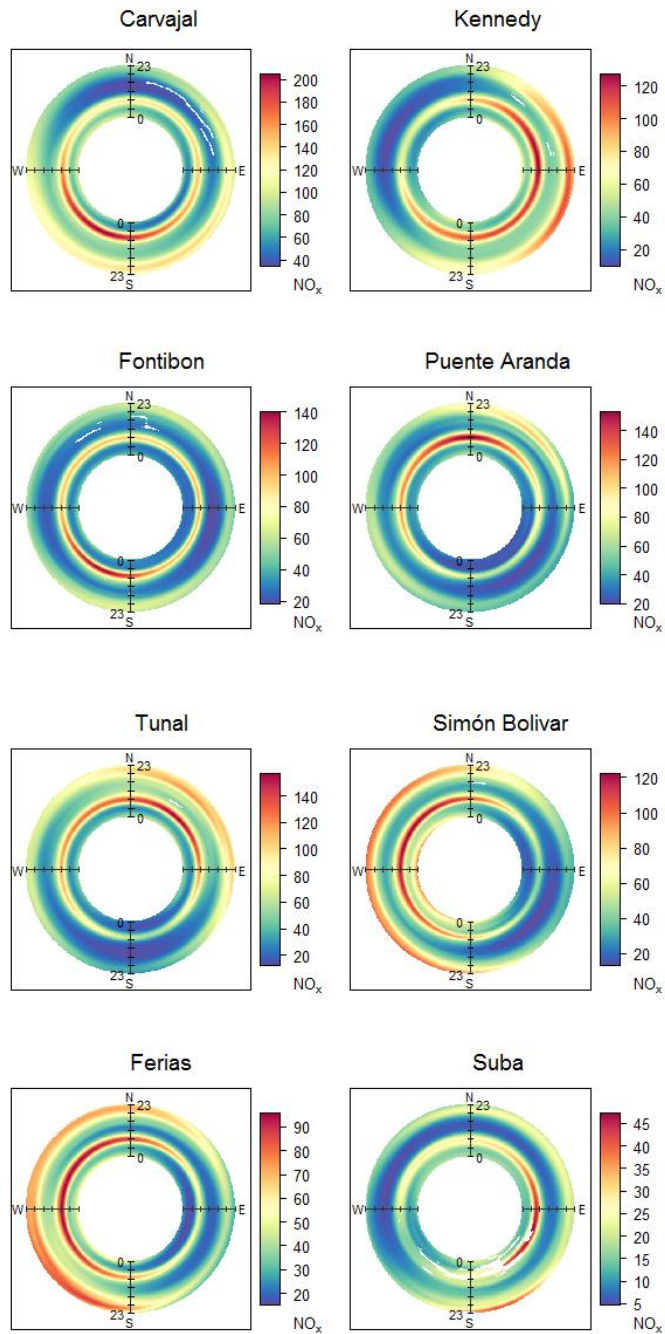
Se observa que las máximas concentraciones se mantienen aproximadamente durante todo el año en la dirección oeste Figura 31-3 Gráfica polar variación mensual de la concentración  $\text{NO}_x$  estación Ferias

**Figura 31-3:** Gráfica polar de la concentración  $\text{NO}_x$  para periodos mensuales entre 2009 y 2011 estación Ferias RMCAB.



La figura 32-3 muestra la variación de la concentración de  $\text{NO}_x$  por hora del día, para todas las estaciones de la RMCAB. Se observan dos momentos con concentraciones altas: el primero en las horas de la mañana, entre las 6:00 y las 9:00, y el segundo en las horas de la noche, entre las 18:00 y las 23:00, aproximadamente; siendo mayor la concentración en las horas de la mañana. Este comportamiento normalmente representa los dos momentos de congestión vehicular que se presentan en el día; una hora pico en la mañana y la otra en la noche.

**Figura 32-3:** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de  $\text{NO}_x$  por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB





### 3.3.6 Análisis de la concentración de NO<sub>2</sub>

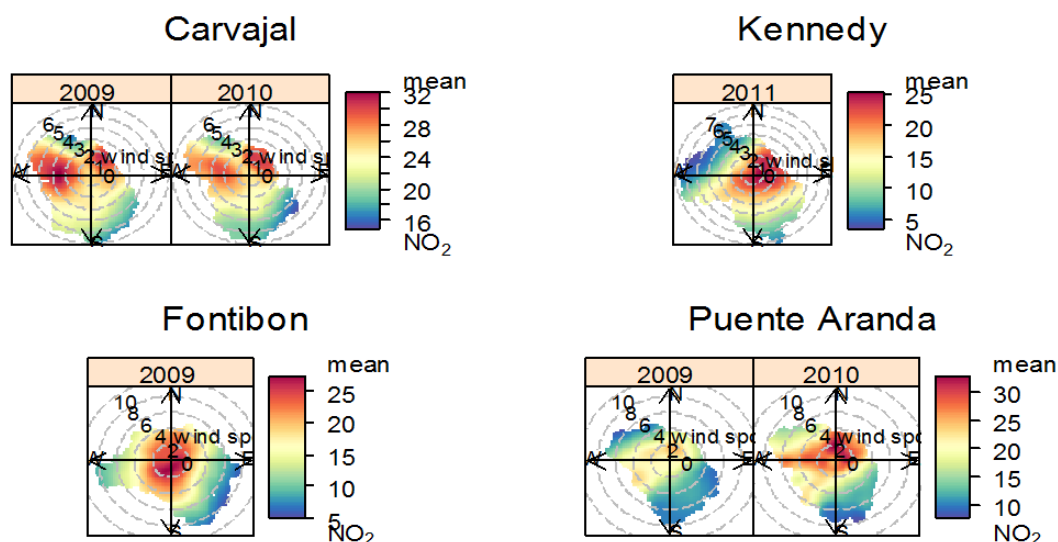
La figura 33-3 muestra el gráfico polar de los valores de concentración de NO<sub>2</sub>, para las estaciones de la RMCAB. Se observa que las máximas concentraciones se pueden asociar a emisiones primarias y formación secundaria. Las emisiones primarias, principalmente de fuentes móviles, se pueden observar en la asociación que se presentan en los máximos valores de concentración en el origen de los gráficos polares de NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (figuras 30-3 y 33-3).

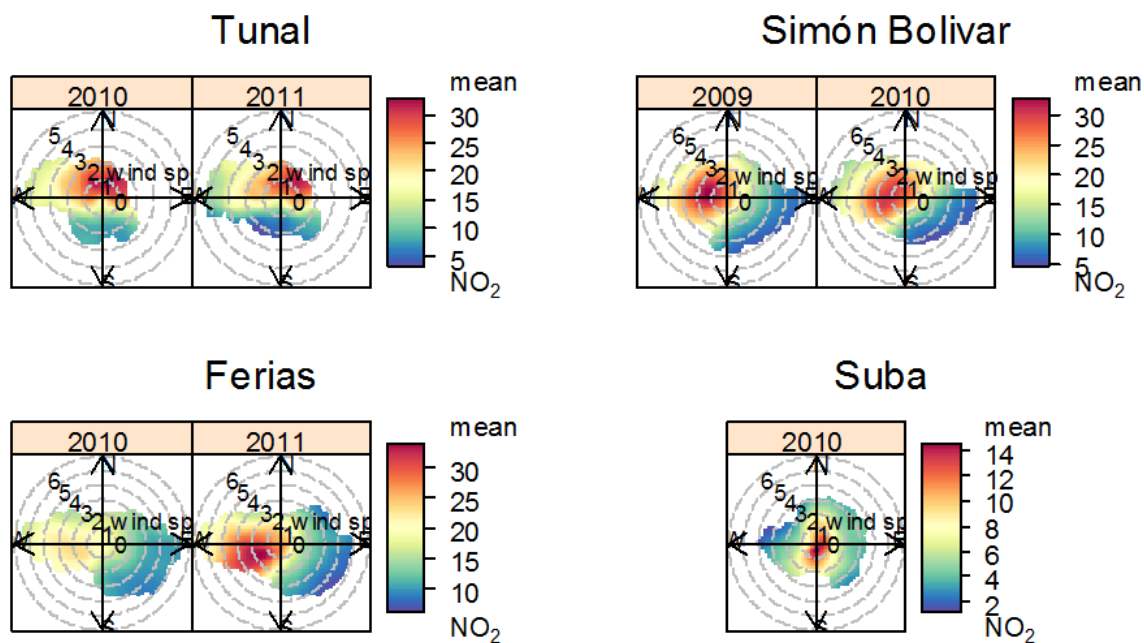
La formación secundaria se puede asociar con valores altos de concentración que llegan con velocidades de viento, aproximadamente mayor de 2 m/s, las cuales se observan alejadas del origen del gráfico.

Para las estaciones de Carvajal, Puente Aranda, Ferias y Simón Bolívar se observa que los valores altos de contaminación secundaria del NO<sub>2</sub> llegan con vientos principalmente con dirección oeste, a su vez, las estaciones de Kennedy y Fontibón esta alta contaminación secundaria parece estar llegando en casi todas las direcciones, por su parte en la estación de Tunal la dirección predominante de llegada de esta contaminación es norte entre el oeste y el este.

Al igual que con los valores de la concentración de NO<sub>x</sub>, la calidad de la información suministrada para el NO<sub>2</sub> es relativamente pobre, dados los bajos porcentajes de captura de este contaminante (tabla 10-3). Por lo tanto, se selecciona como información relevante la concentración de NO<sub>2</sub> registrada por las estaciones de Ferias y Simón Bolívar para el período 2010-2011.

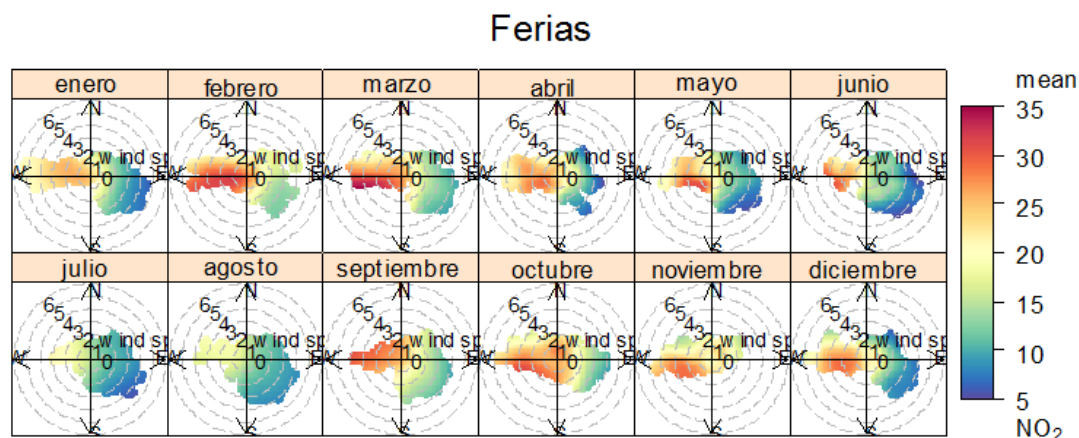
**Figura 33-3:** Gráfico polar de la concentración de NO<sub>2</sub> para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB





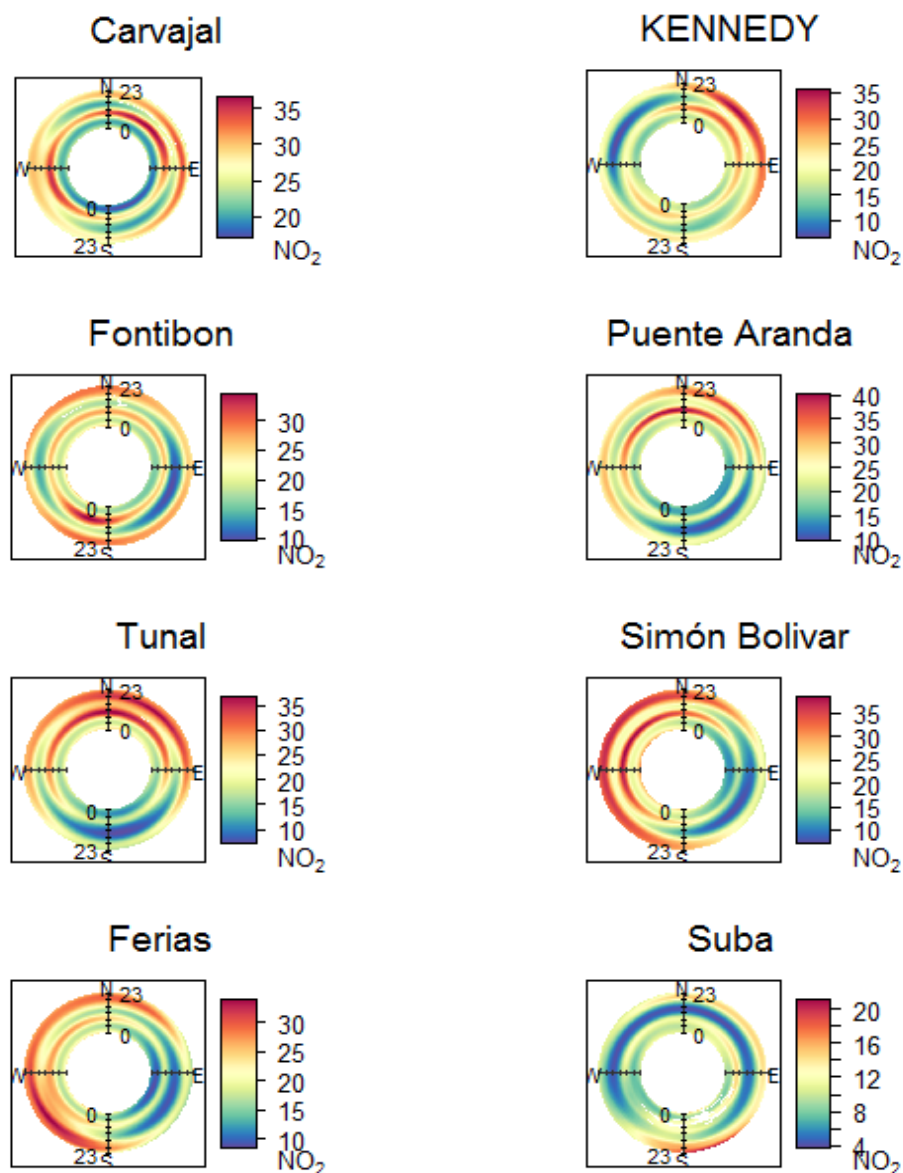
Los mayores valores de concentración de NO<sub>2</sub> reportados en cada estación no cambian significativamente a lo largo del año. La figura 34-3 muestra, por ejemplo el gráfico polar/ mes de la concentración de NO<sub>2</sub> de la estación de las Ferias. Se observa como los mayores valores de concentración se presentan casi en forma continua durante todos los meses del año y sin cambio significativo de dirección, principalmente con vientos que vienen del oeste. Los gráficos de las otras estaciones se encuentran en el anexo.

**Gráfico 34-3:** Gráfico polar de la concentración de NO<sub>2</sub> para periodos mensuales entre 2009 y 2011 estación Ferias RMCAB.



La figura 35-3 muestra la variación de la concentración del NO<sub>2</sub> por hora del día para las estaciones de la RMCAB donde se registra este contaminante. Los valores máximos se presentan en dos picos, en la mañana y al final del día. Por su parte, al observar la gráfica polar anular del NO<sub>x</sub> y del NO<sub>2</sub> se encuentra una alta similitud de los valores máximos de la mañana coincidiendo con la hora pico del tráfico automotor.

**Figura 35-3:** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de NO<sub>2</sub> por hora del día para el período 2009-2011 estaciones de la RMCAB

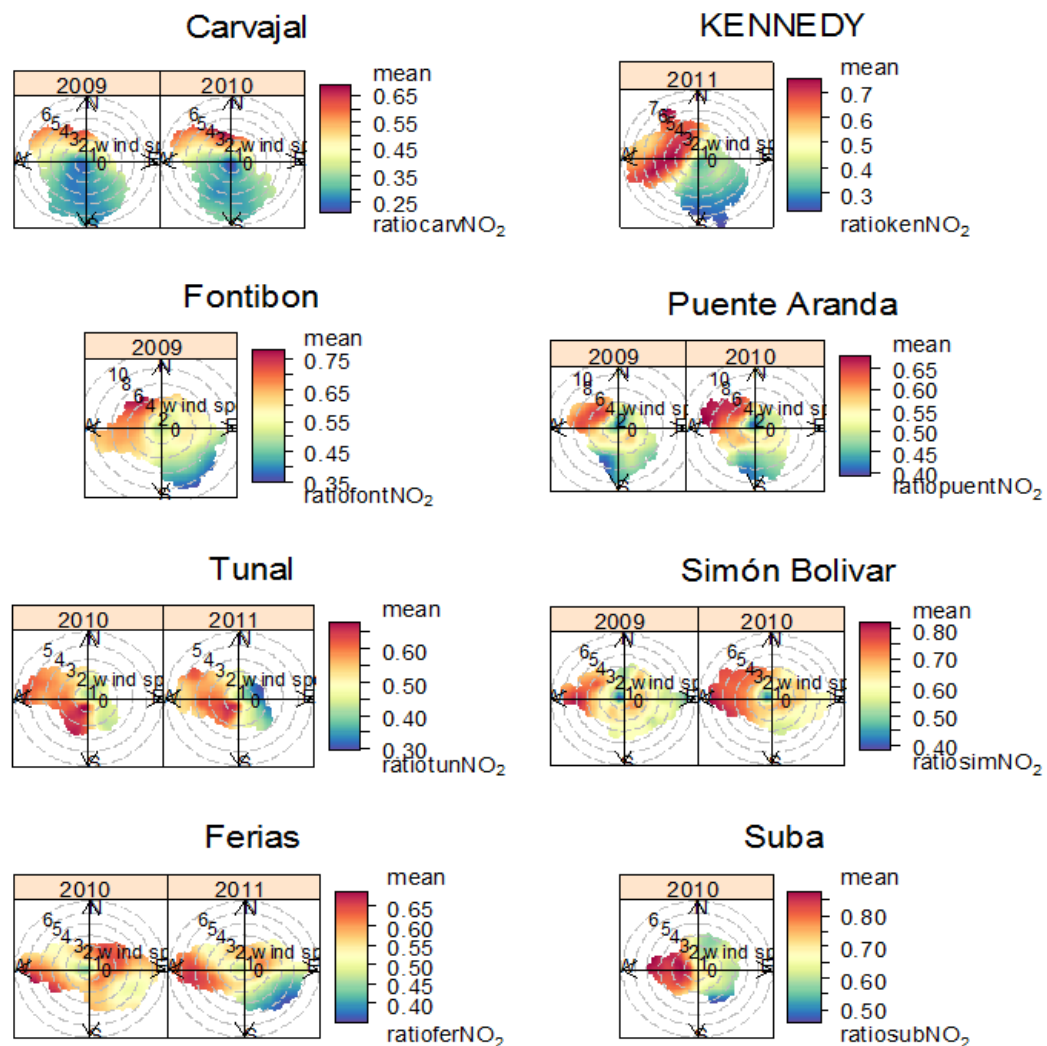


### 3.4 Etapa 3-2 Evaluación del desempeño de Openair en la generación de nuevo conocimiento sobre calidad del aire en Bogotá

#### 3.4.1 Análisis relación del sistema $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ – ozono

Los valores de concentración de  $\text{NO}_x$  registrados en las estaciones de RMCAB corresponden a la suma de las contracciones del monóxido y el dióxido de nitrógeno. La proporción de los 2 óxidos de nitrógeno en el  $\text{NO}_x$  cambia debido principalmente a la reacción entre el NO y  $\text{O}_3$ .

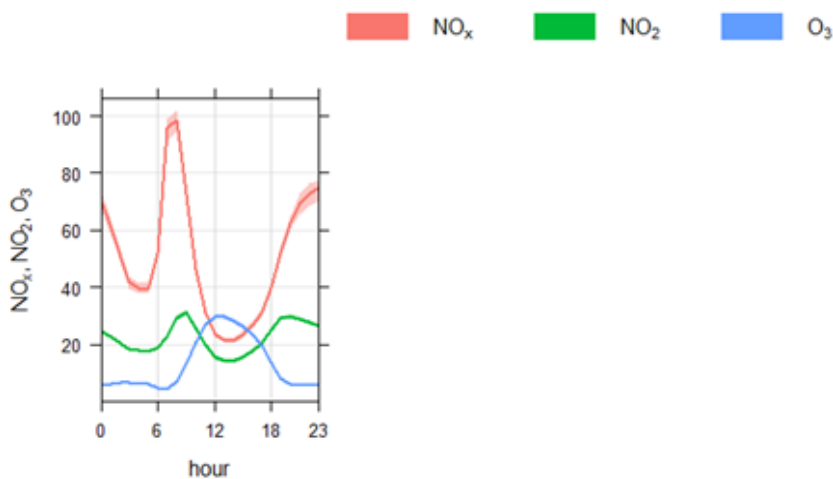
**Figura 36-3:** Gráfico polar de la relación de concentraciones  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  para periodos anuales entre 2009 y 2011 estaciones de la RMCAB



La figura 36-3 muestra que las estaciones de la RMCAB presentan valores bajos de relaciones de concentración de  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  con vientos en calma, debido principalmente a que en estos sitios el dióxido de nitrógeno es de generación primaria, proveniente de fuentes vehiculares, y por consiguiente, su contribución al  $\text{NO}_x$  es baja con respecto al NO. Por otra parte, se observa que la dirección del viento que traen los mayores valores de relación  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  coincide principalmente con la dirección de los vientos asociada a los valores máximos de  $\text{O}_3$ . Según esto, se puede asumir que el ozono va reaccionando con el NO que va encontrando en su recorrido para producir  $\text{NO}_2$ . Lo anterior podría incidir en los mayores valores de relación de  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  encontrados en la estación de Suba y Simón Bolívar, ya que, el  $\text{O}_3$  que atraviesa la ciudad tiene la posibilidad de reaccionar con el  $\text{NO}_x$  que encuentra en las vías principales, principalmente.

La figura 37-3 muestra la forma en que se relacionan las concentraciones de:  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_x$  por hora del día. Los resultados corresponden a la estación de Simón Bolívar y son similares para todas las estaciones. Se observa que el período del día cuando más aumenta la concentración de ozono es en las horas de medio día, coincidiendo con la disminución de la concentración de  $\text{NO}_2$ .

**Figura 37-3:** Gráfico función temporal  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_2$  para el período 2009-2011 estación de Simón Bolívar

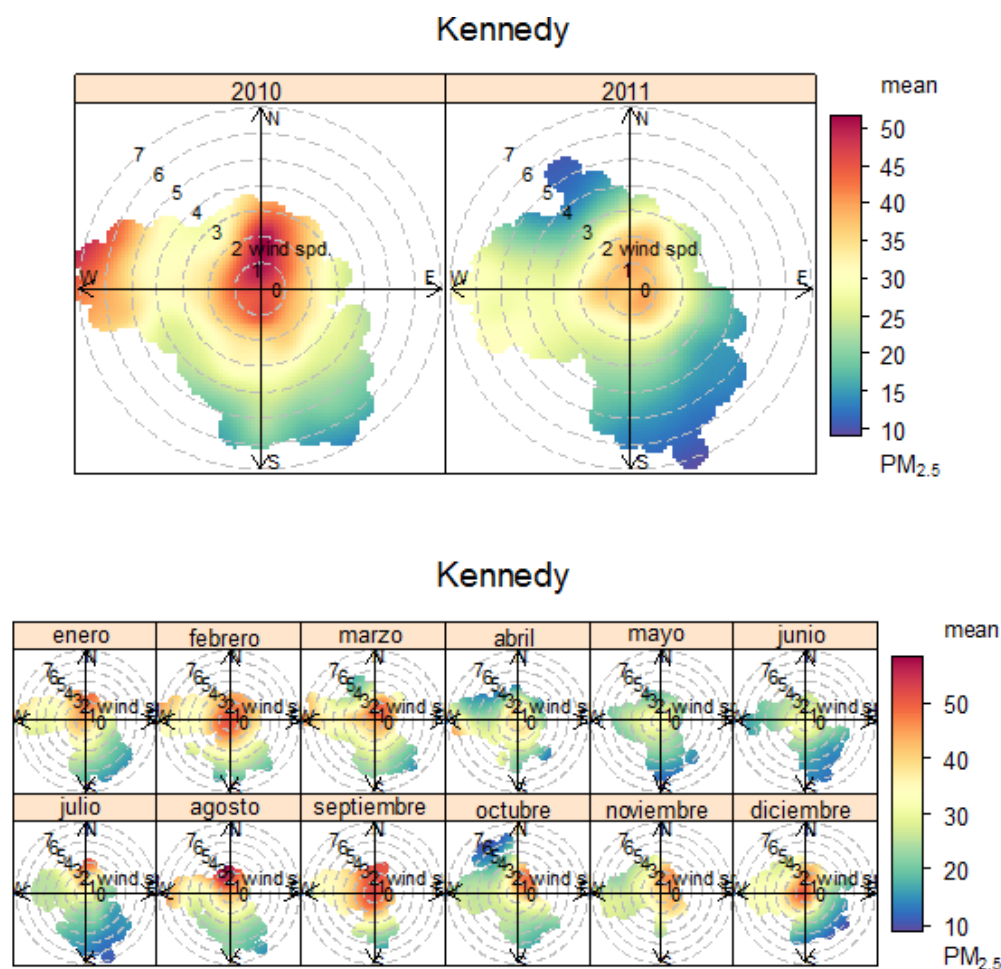


### 3.4.2 Análisis de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$

La figura 38-3 presenta los mayores valores de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en la estación de Kennedy, los cuales, parecen provenir de dos fuentes. La primera, con valores de concentración fluctuando entre 30 y 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se presenta con vientos que vienen del oeste

entre las direcciones oeste-suroeste y oeste-noroeste, con valores de velocidad superiores a 6 m/s, lo que podría asumirse como  $PM_{2.5}$  generado regionalmente por fuentes en esa dirección. Los valores más altos se presentan entre los períodos enero a marzo y agosto a septiembre. La segunda fuente de contaminación se observa con vientos en calma, a velocidades bajas del viento y en todas las direcciones, con valores entre 30 y 45  $\mu g/m^3$ , aproximadamente, lo cual podría considerarse como de generación primaria, principalmente de procesos de combustión. Los valores de la concentración de  $PM_{2.5}$  para esta estación muestran una disminución entre el 2010 y el 2011.

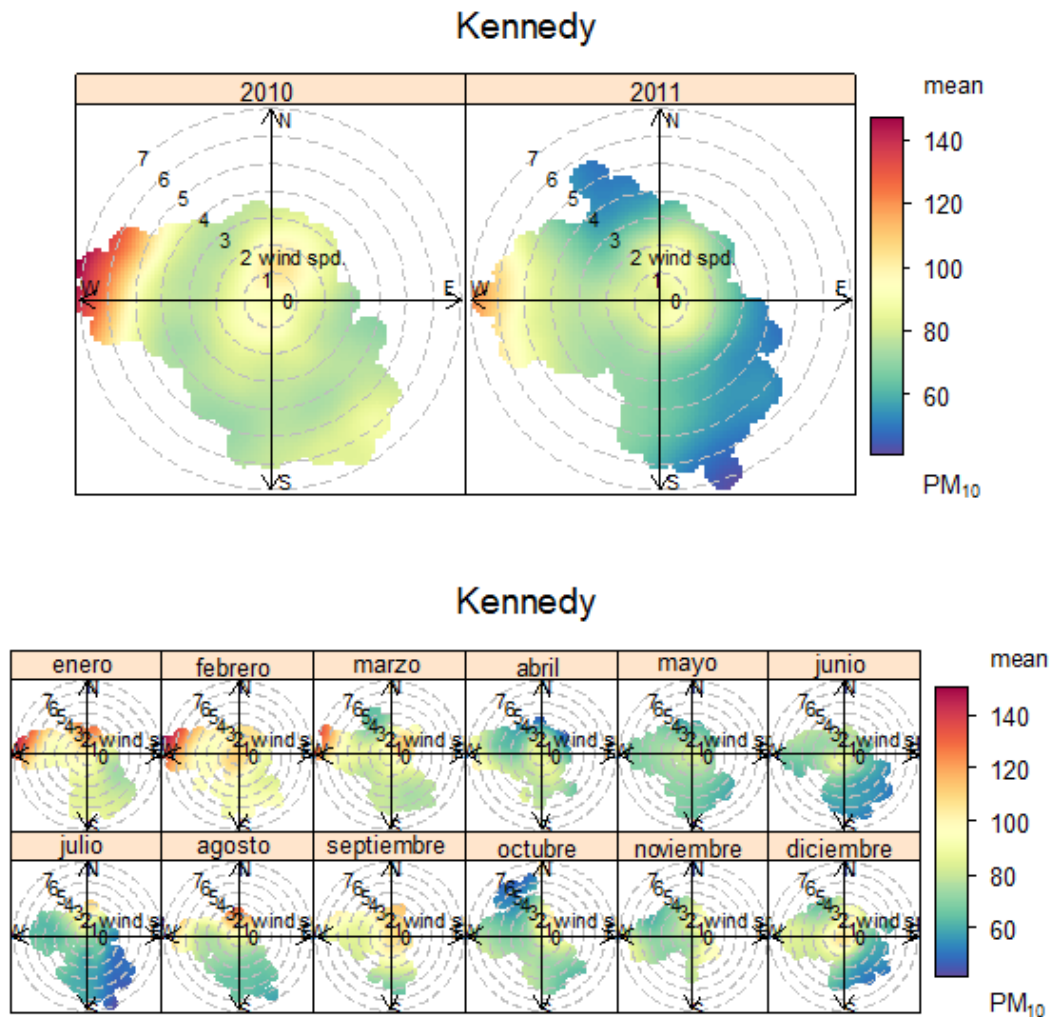
**Figura 38-3:** Gráfico polar de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  de la estación de Kennedy. Parte superior período de años y en la parte inferior por mes en el período 2010-2011.





Al comparar las figuras 39-3 y 40-3, se observa la asociación que existe entre las máximas concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ; al mismo tiempo, el gráfico polar de las relaciones de  $PM_{2.5}/PM_{10}$  (figura 40 -3), muestra que los mayores valores de relación se encuentran con vientos en calma, correspondientes a fuentes locales de combustión.

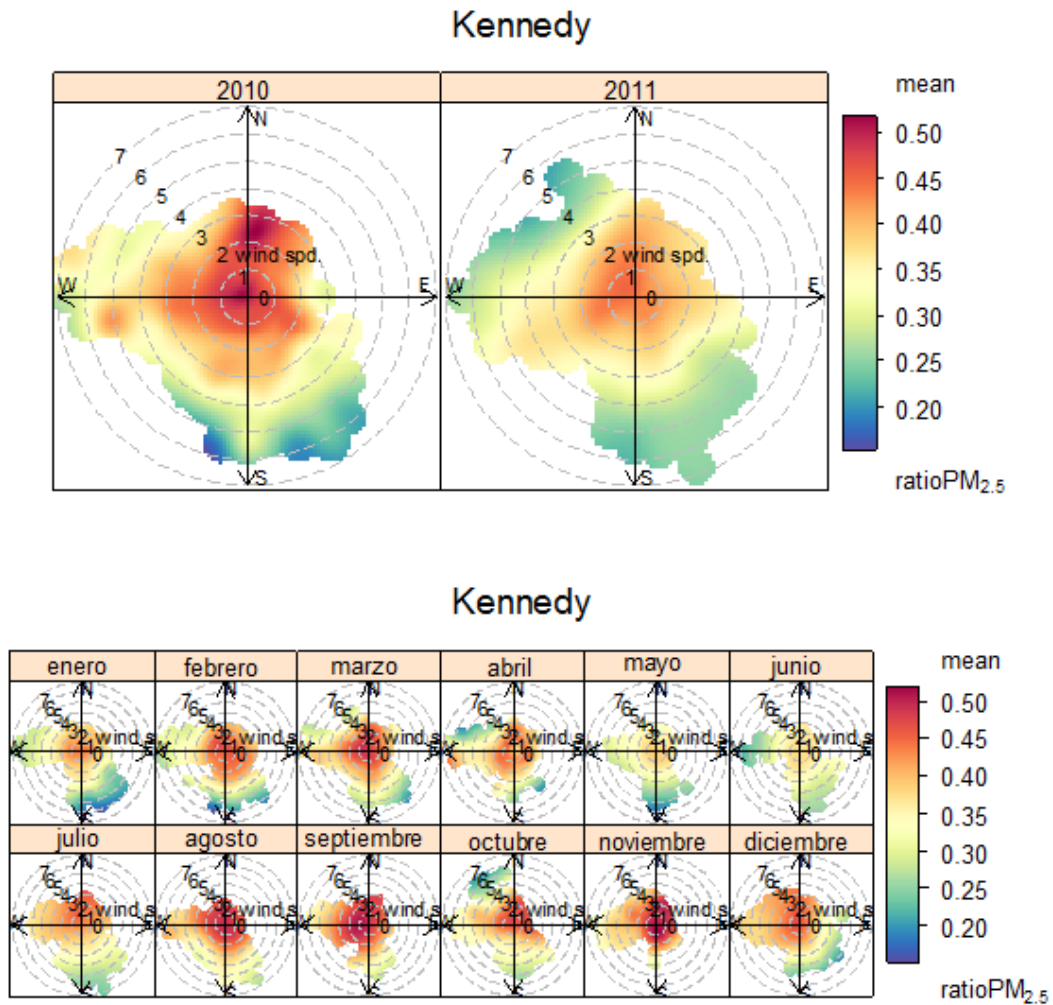
**Figura 39-3:** Gráfico polar de las concentraciones de  $PM_{10}$  de la estación de Kennedy. Parte superior período de años y en la parte inferior por mes en el período 2010-2011



En la figura 40-3 se observa que el tamaño del material particulado asociado con vientos que vienen de la dirección oeste cambia en el transcurso del año, dado el cambio que se observa en los valores de razón del  $PM_{2.5}/PM_{10}$ . Los menores valores de la relación ocurren en el primer semestre del año y las mayores en el segundo semestre. Con vientos en calma, la relación se mantiene aproximadamente constante en 0,5 durante el año. Podría pensarse que el

comportamiento del material particulado en la dirección oeste estaría relacionado con la naturaleza de concentración secundaria del  $PM_{2.5}$ , la cual, estaría asociada con algunos precursores del  $PM_{2.5}$ .

**Figura 40-3:** Gráfica polar relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  estación Kennedy para el periodo 2010-2011



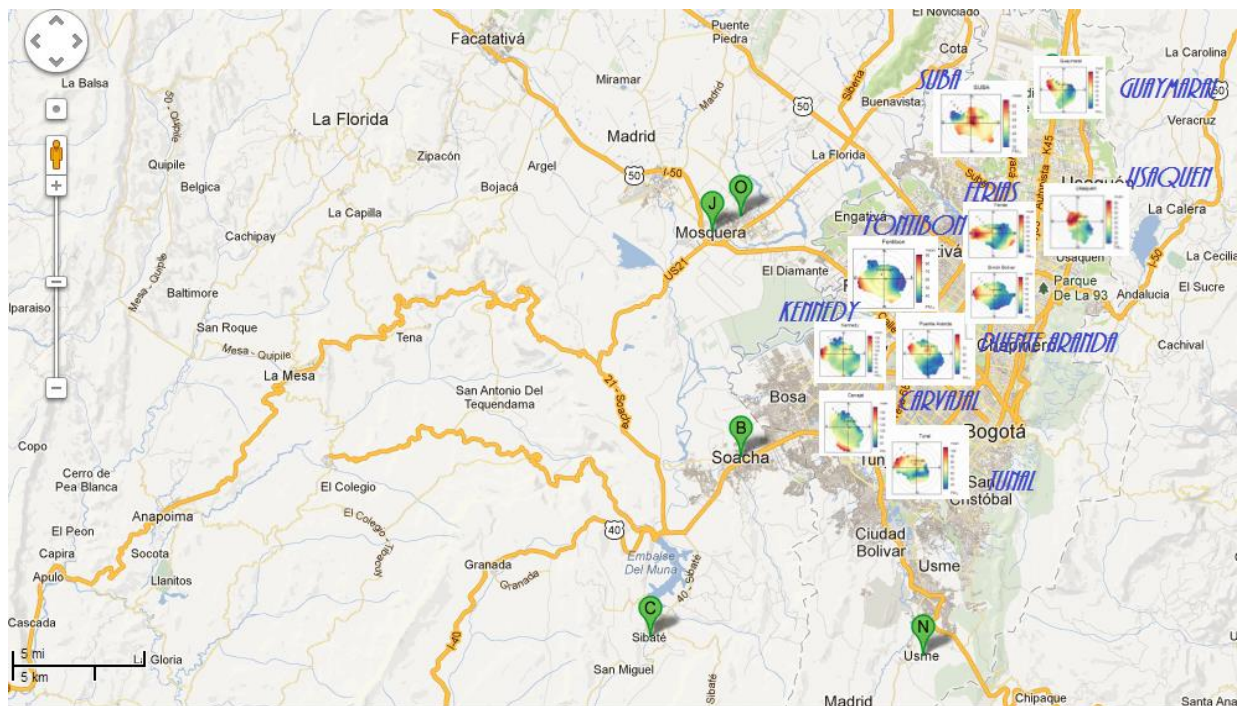
### 3.5 Análisis de la variación espacial de la concentración

La figura 41-3 presenta un mapa de Bogotá sobre el cual se ubicaron las gráficas polares de la concentración de  $PM_{10}$  para las estaciones de la RM CAB. Cada gráfico está en su propia escala para mostrar la procedencia de sus valores más altos. Se observa una fuerte tendencia de valores máximos de  $PM_{10}$  con vientos de relativamente alta velocidad que proceden de la dirección oeste



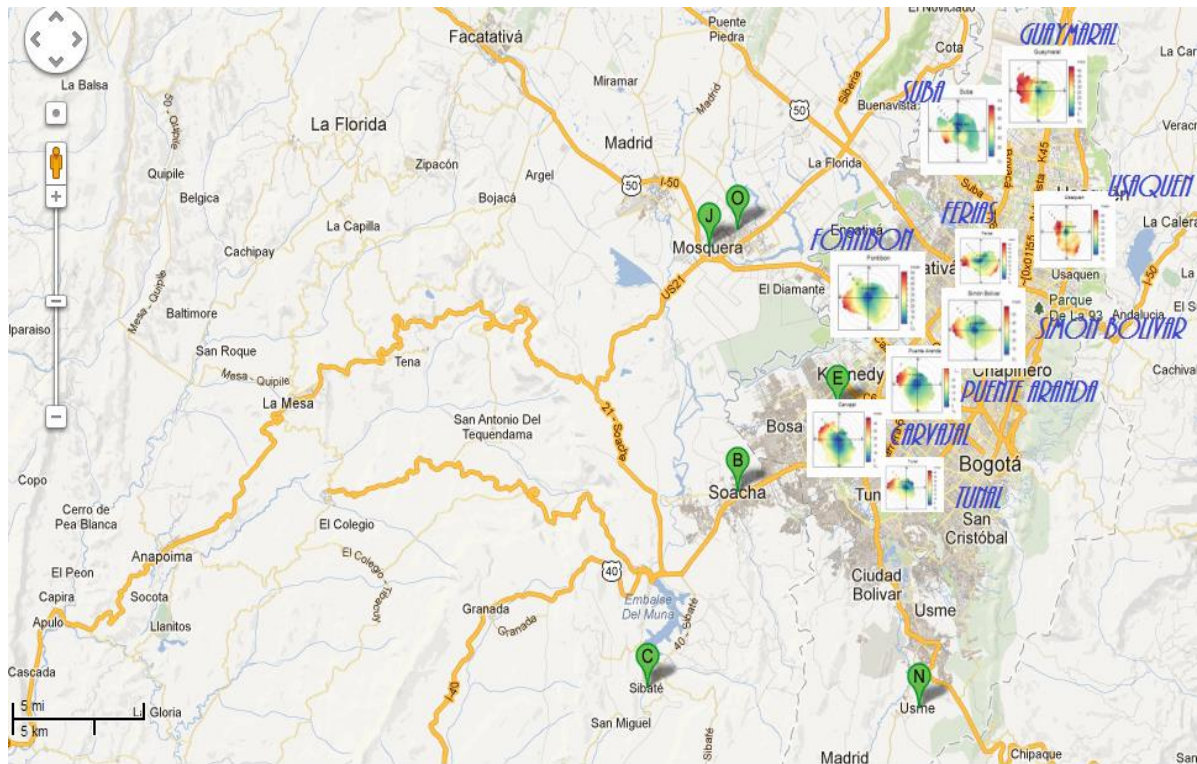
(fuentes relativamente lejanas) y con vientos en calma (fuentes locales). La estación de Carvajal parece estar registrando valores altos en la concentración de  $PM_{10}$  procedentes de la región de Sibaté.

**Figura 41-3:** Diagrama polar para la concentración de  $PM_{10}$  de las estaciones de la RMCAB. Se muestran las regiones vecinas a Bogotá de las cuales parece provenir la contaminación regional de  $PM_{10}$  registrada por la RMCAB. Fuente: Elaboración propia utilizando Google Maps®.



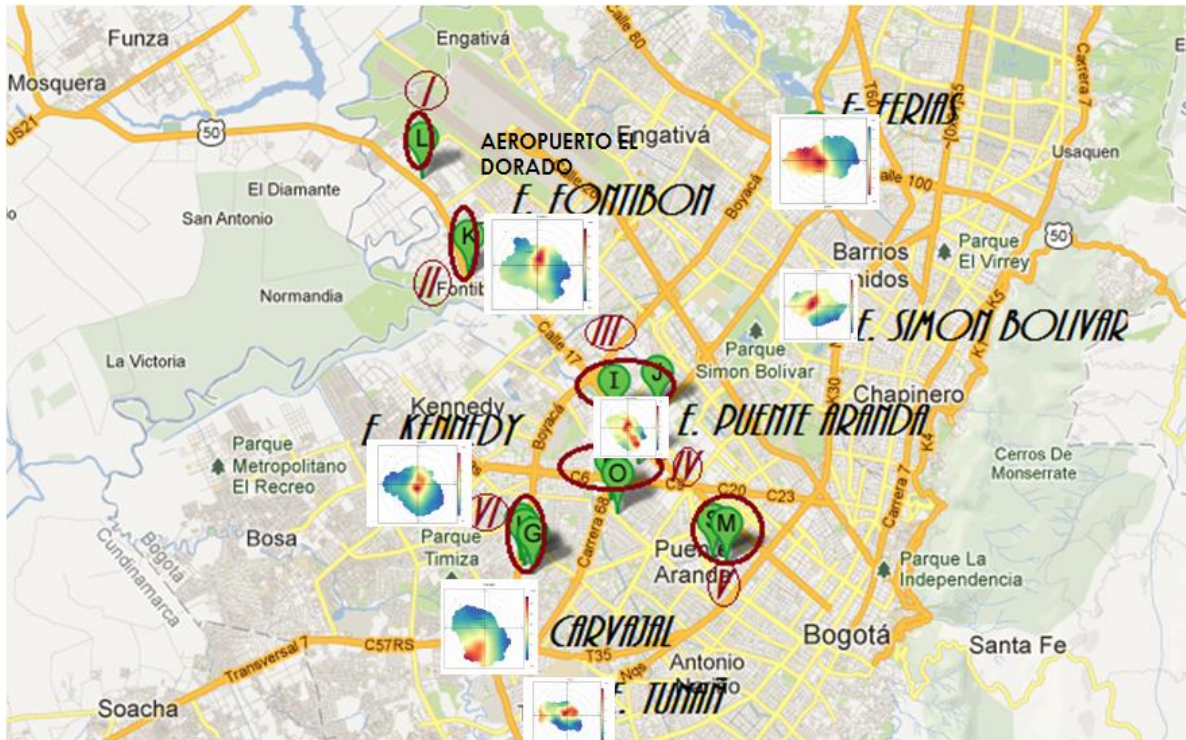
La figura 42-3 muestra los gráficos polares de las concentraciones de  $O_3$  para las estaciones de la RMCAB. Al comparar los gráficos polares de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $O_3$ , se puede observar que en la mayoría de estaciones se presenta similitud en la procedencia de los valores más altos de concentración, principalmente en la dirección oeste ; con vientos que tienen velocidad aproximadamente superior a 5 m/s.

**Figura 42-3:** Diagrama polar para la concentración de  $O_3$  de las estaciones de la RMCAB. Se muestran las regiones vecinas a Bogotá de las cuales parece provenir la contaminación regional de  $O_3$  registrada por la RMCAB. Fuente: Elaboración propia utilizando Google Maps®.



La figura 43-3 presenta un mapa de Bogotá donde se ubicaron los gráficos polares de la concentración de  $SO_2$  registrados por las estaciones de la RMCAB. Esta gráfica muestra la dirección de las máximas concentraciones de  $SO_2$  para cada estación y permite, por ejemplo, mostrar la posible influencia del Aeropuerto El Dorado en los valores registrados en la estación de Fontibón.

**Figura 43-3:** Diagrama polar para la concentración de  $\text{SO}_2$  de las estaciones de la RMCAB. Se muestran las fuentes fijas (indicadas con los números romanos) que emplean carbón como combustible. Fuente: Elaboración propia utilizando Google Maps®.

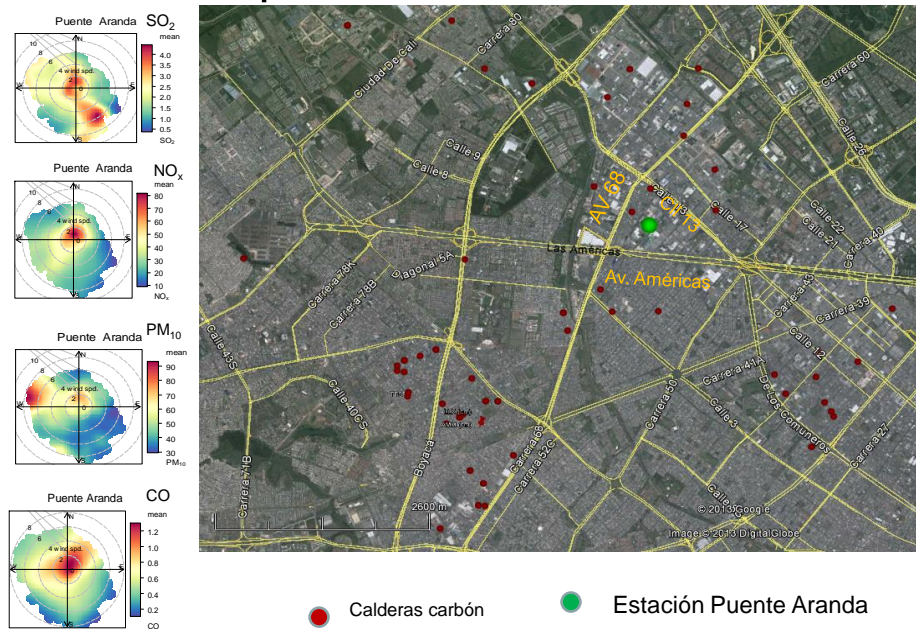


La figura 44-3 presenta una fotografía satelital de Bogotá donde se ubica la estación de Puente Aranda, vías principales, así como las calderas que operan con carbón que se encuentran en la cercanía. Igualmente en esta figura se muestran las graficas polares de los contaminantes registrados en esta estación, con el fin de poder proponer posibles relaciones entre estas fuentes de contaminación y lo registrado en la estación de Puente Aranda.



**Figura 44-3:** Diagramas polares para las concentraciones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  de la estación de Puente Aranda. Se muestran las fuentes fijas que emplean carbón como combustible y las vías principales. Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth®

## Análisis espacial Estación Puente Aranda



Empleando mapas como los presentados en las figuras 41-3 a 44-3, se realizó una matriz para encontrar posibles relaciones entre fuentes de contaminación local y regional, y la información registrada por las estaciones de la RMCAB (Tabla 11-3). Los otros mapas se encuentran en anexos. En la primera la columna de la matriz se encuentra las fuentes de contaminación, clasificadas como móviles (vías principales) y fijas (contaminación de calderas). En la primera fila las estaciones de la RMCAB seleccionadas. Con diferentes colores se identifican los contaminantes. Por ejemplo, se observa la posible incidencia de la región de Funza-Mosquera en cuanto a la generación de precursores para la formación de ozono y  $\text{PM}$  secundario. Un análisis similar se observa para observar la influencia de las vías principales sobre los valores de  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ .

**Tabla 11-3:** Matriz de relación estaciones de la RMCAB- fuentes de contaminación y contaminantes

LOCALIZACIÓN DE FUENTES		Carvajal			Kennedy			Fontibón			Puente Aranda			Tunal		
Fuentes móviles	Autopista Sur															
	Av. Boyacá															
	Av. 68															
	Av. Américas															
	Calle 13															
	Calle 26															
	Aeropuerto															
	Central de Abastos															
Fuentes fijas	Sibaté															
	Cazucá															
	ZF-CC**															
	ZI-CC*															
	Usme															
	Funza- Mosquera															

## Contaminantes

O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	CO

\* Empresas en la zona industrial de Bogotá que emplean carbón como combustible

\*\*Empresas en la zona industrial de Fontibón que emplean carbón como combustible

En la matriz anterior no se consignaron las estaciones que se hallaban en el centro y norte de Bogotá, tales como, Simón Bolívar, Ferias, Suba, Usaquén Y Guaymaral. Los máximos valores registrados en estas estaciones muestran una influencia de todo el sector industrial de Bogotá, así como de vías principales cercanas, lo que hace complejo asignar una fuente en particular. Adicionalmente, estaciones como Usaquén, Guaymaral y Suba no registran todos los contaminantes.

<i>Implementación del Software estadístico Openair.....</i>	<i>83</i>
---	-----------

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

En este trabajo se hizo un análisis de la información producida por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), incluyendo la evaluación de los informes generados por la Red y el análisis de las series de datos, utilizando herramientas del paquete Openair de la aplicación estadística R.

Se observó que los informes muestran el resultado de un análisis estadístico básico de las variables meteorológicas y las concentraciones de contaminantes del aire en cada estación de la red, describiendo las variaciones de dichos parámetros en diversos períodos, como por ejemplo el ciclo diario, la variación a lo largo del año y la comparación de las distribuciones estadísticas registradas a lo largo de los años, con el fin de observar tendencias de evolución de la contaminación del aire.

El propósito principal de los informes producidos por la red es determinar el grado de cumplimiento de las normas de calidad del aire, mas no se observa la intención de utilizar la información para determinar la ubicación de las fuentes emisoras de contaminantes con mayor influencia sobre las concentraciones de contaminantes, ni para inferir el tipo de fuente de mayor influencia, ni para comprender los procesos fisicoquímicos de transformación de los contaminantes para dar origen a contaminantes secundarios. Puede afirmarse, entonces, que la información registrada por la red está siendo subutilizada en el marco de la gerencia de calidad del aire.

Las series de datos recibidas no cumplen con los criterios de continuidad para hacer un análisis completo y uniforme durante todo el período de existencia de la RMCAB. Se observó ausencia de datos durante largos períodos y falta de coincidencia en la operación de las diversas estaciones, de manera que sólo existen datos suficientes para un análisis completo de la red durante un período relativamente corto de su operación, entre 2009 y 2011. De manera similar, no se encontró ninguna estación que tuviera registros de todos los contaminantes a la vez con un porcentaje de captura superior al mínimo establecido de 75% en un año completo.

A partir de la información recibida del período de 2009 a 2011, se escogió el gráfico polar como la herramienta de Openair que genera mayores aportes a la determinación de la contribución de diversos tipos de fuente y su localización aproximada, permitiendo diferenciar fuentes regionales y locales que inciden sobre cada estación de la red. Para las estaciones de Carvajal, Fontibón y Puente Aranda, se encontró que la contribución más importante a altas concentraciones de  $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  y  $SO_2$  se asocia a fuentes ubicadas en los corredores industriales de la Sabana Occidental y Soacha. A su vez, altas concentraciones de  $NO_x$ , CO y  $PM_{10}$  registradas en la estación de Puente Aranda mostraron una influencia significativa de las emisiones de fuentes móviles en la Avenida de las Américas, la Calle 13 y la Avenida 68.



El análisis de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  y la relación  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  permite inferir que los promotores del ozono registrado en altas concentraciones en las estaciones del Norte de la ciudad, especialmente entre los meses de diciembre a marzo, son emitidos principalmente en las zonas industriales de Sabana Occidente, Cazucá y Usme.

## **4.2 Recomendaciones**

Debido a la dificultades encontrada en cuanto acceso a la bases de datos de la RMCAB se recomienda que la SDA permita descargar la base de datos completa desde su página web como un solo archivo plano, además de la descarga que permite actualmente, que se basa en archivos de Excel estación por estación para un período limitado.

Se debería mejorar la cobertura de la medición del  $\text{PM}_{2.5}$ , con el fin de obtener mejor información sobre la contaminación por aerosol secundario y por fuentes de combustión. Para mejorar el análisis del efecto de la contaminación producida por fuentes móviles, se debería realizar un estudio de ubicación de sitios de monitoreo en las condiciones adecuadas para tal fin, es decir, estaciones al lado de vías. De igual forma, se hace necesaria la ubicación de sitios de monitoreo con las condiciones adecuadas para registrar concentraciones de fondo en diversas direcciones.

## Bibliografía

- (1) ARISTIZABAL J.P. Determinación de las condiciones de frontera para el modelo de calidad de aire de Bogotá empleando de Chimere, 2010.
- (2) BEHRENTZ E., SÁNCHEZ N., FANDIÑO M. Parte A – Inventario de emisiones de Fuentes fijas, Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad de aire de Bogotá, Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de los Andes, 2008a.
- (3) CARSLAW David. Openair: The openair manual open-source tools for analysing air pollution data. (en línea) (5 de mayo de 2012) Disponible en: <http://www.openairproject.org/Downloads/OpenairManual.aspx..>
- (4) CLAPPL. Y JENKIN M. Analysis of the relation ship between ambient levels of O3, NO2 and NO as a function of NOx in the UK. Atmospheric Environment 35 (2001) 6391–6405
- (5) DEFRA (2005) Particulate Matter in the United Kingdo Summary. (en línea) (20 de octubre de 2011).Disponible en: <http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/air/airquality/publications/particulate-matter/documents/pm-summary.pdf>.
- (6) DEFRA (2011). Trends in NOx and NO2 emissions and ambient measurements in the UK.(en línea) (29 de octubre de 2011) Disponible en: [http://ukair.defra.gov.uk/reports/cat05/1108251149\\_110718\\_AQ0724\\_Final\\_report.pdf](http://ukair.defra.gov.uk/reports/cat05/1108251149_110718_AQ0724_Final_report.pdf).
- (7) DEFRA( 2012). Fine Particulate Matter (PM2.5) in the United Kingdom. (en línea). (22 de enero de 2013). disponible en:[http://ukair.defra.gov.uk/reports/cat11/1212141150\\_AQEG\\_Fine\\_Part particulate\\_Matter\\_in\\_the\\_UK.pdf](http://ukair.defra.gov.uk/reports/cat11/1212141150_AQEG_Fine_Part particulate_Matter_in_the_UK.pdf). Consultado el 22 ENERO 2013.
- (8) KENT Andrew y CARSLAW David (2009) Analysis of air pollution in North Lincolnshire, Institute for Transport Studies, University of Lee . (en línea) (22 de julio de 2011) Disponible en: [http://www.nlincsair.info/documents/reports/128090223\\_NorthLincs\\_R\\_Project\\_Report.pdf](http://www.nlincsair.info/documents/reports/128090223_NorthLincs_R_Project_Report.pdf) .
- (9) OMS (Organización Mundial de la Salud) (2005) Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre (en línea) (10 de enero de 2013) disponible en: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)

(10) SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE – SDA. 2009. Subdireccion de calidad del aire, auditiva y visual. Informe trimestral de Calidad del aire en Bogotá – Primer trimestre de 2011 Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. Bogota, D.C. 2011.

(11) SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE (SDA) 2010. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. (en línea) (6 de agosto de 2011). Disponible en: [http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886).

(12) SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE DE BOGOTÁ (SDA) (2011). Red de calidad de aire de Bogotá. (en línea) (enero 21 de 2013) Disponible en: <http://www.secretariadeambiente.gov.co>

(13) SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE (SDA). Informe anual de calidad del aire de Bogotá, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C., Bogotá, 2007

(14) SNIFFER (2010) PM2.5. (en línea) (20 de octubre de 2011) Disponible en: <http://www.dpea.scotland.gov.uk/Documents/qJ13291/J179732.pdf>.

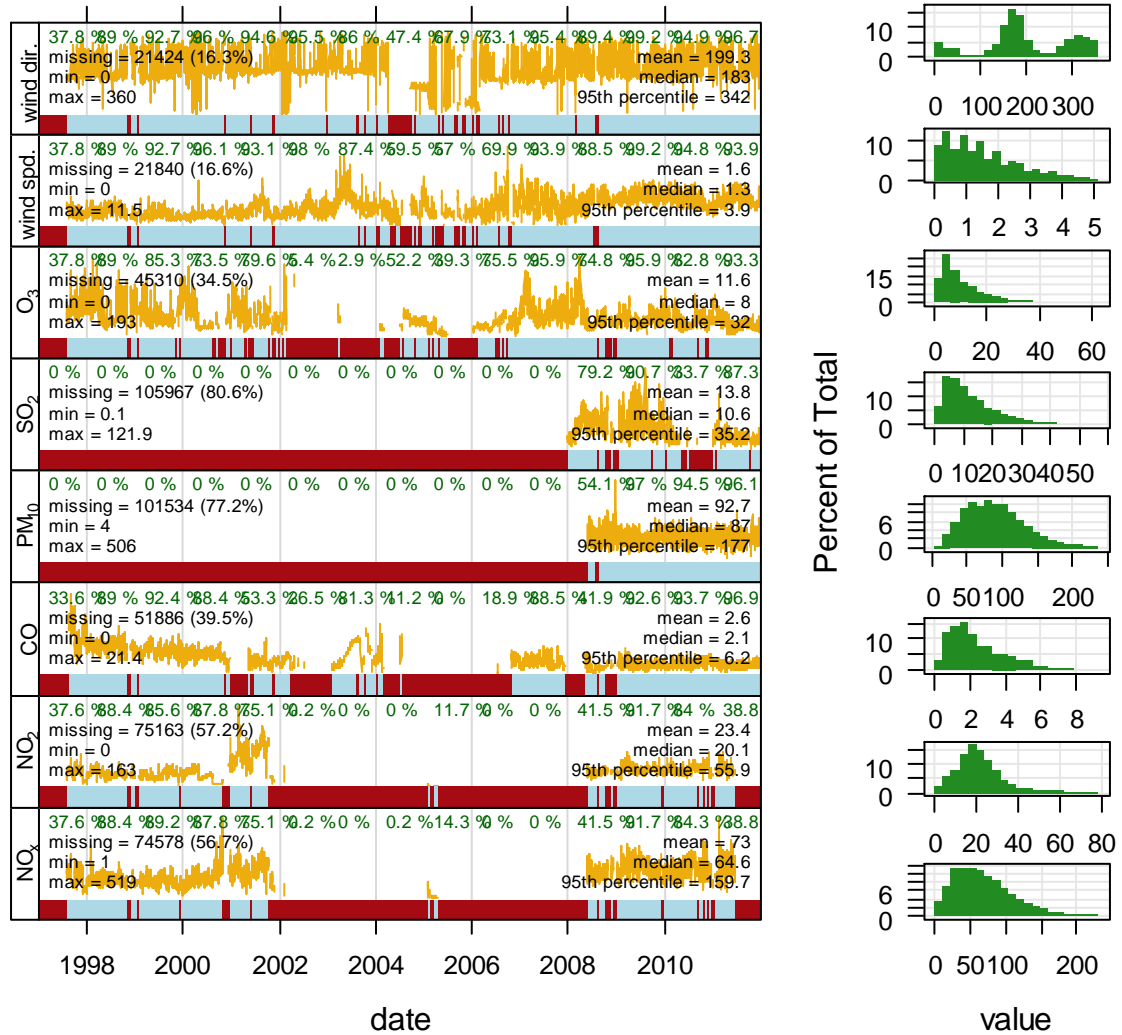
(15) TAMSIN Mitchel (2009), Annual air quality monitoring report for the Wellington región, 2009 (en línea) (5 de mayo de 2012) disponible en: <http://www.gw.govt.nz/assets/councilpublications/Annual%20Air%20Quality%20Monitoring%20Report%20for%20the%20Wellington%20Region,%202009%20web%20version.pdf>.

(16) UNIVERSIDAD MILITAR (2008) Elaboración del inventario de fuentes móviles en jurisdicción de la car y actualización del inventario de fuentes fijas, incluyendo gases de efecto invernadero (en línea) (febrero 12 de 2012) disponible en: [http://cendoc.car.gov.co/cgiin/wxis.exe?IsisScript=OPAC\\_SCRIPT/opac.xis&base=MARC&opcion=buscar&autor=Universidad%20Militar%20Nueva%20Granada&formato=ficha](http://cendoc.car.gov.co/cgiin/wxis.exe?IsisScript=OPAC_SCRIPT/opac.xis&base=MARC&opcion=buscar&autor=Universidad%20Militar%20Nueva%20Granada&formato=ficha)

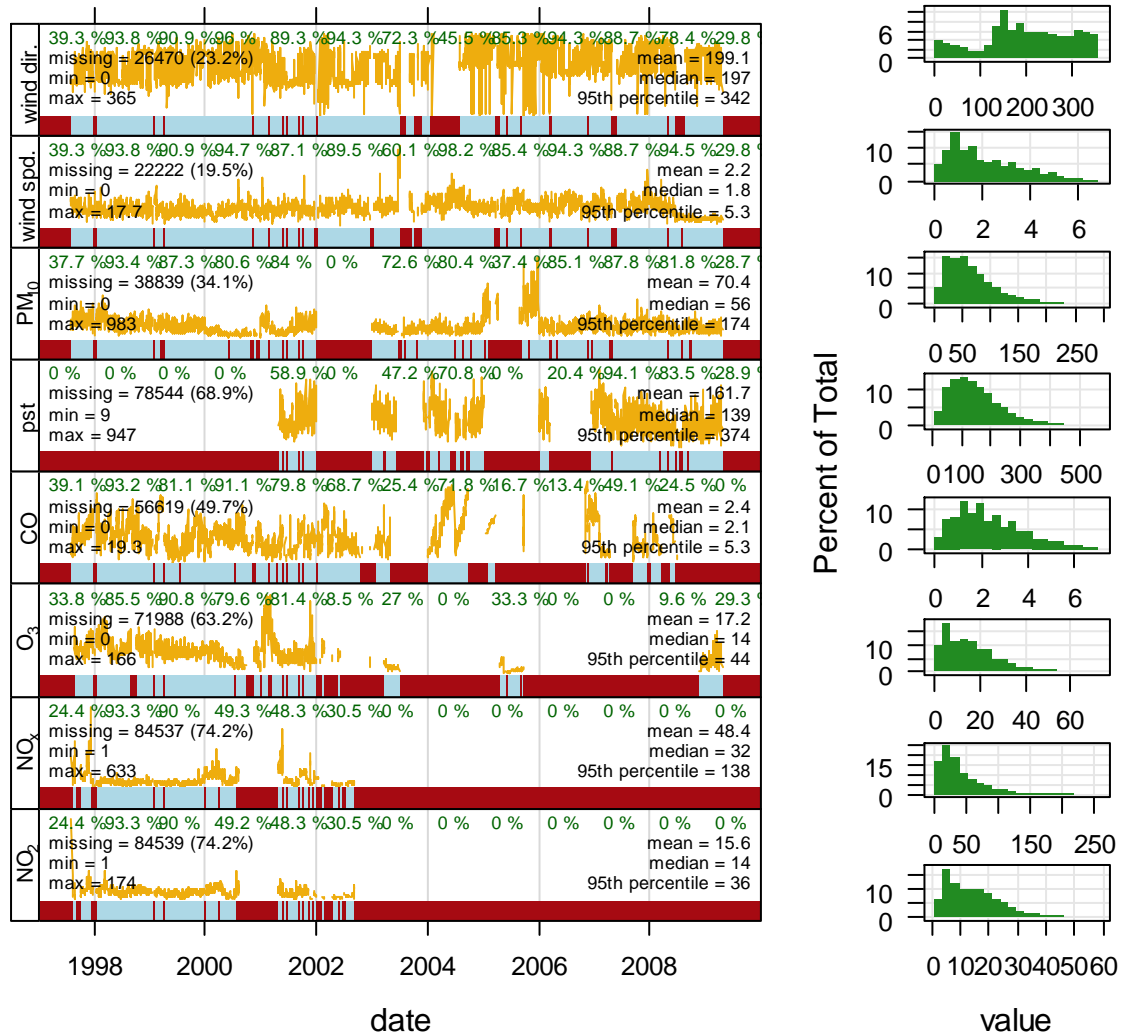
(17)URIBE E. (2005) Air pollution management in two colombian cities: Case Study. (en línea) (12 de diciembre de 2012). Disponible en: [https://www.google.com.co/webhp?source=search\\_app#q=JICA.+\(1992\).+Study+on+Air+Pollution+Control+Plan+in+Santa+Fe+de+Bogota+City+Are,+Final+Report.+Tokyo,+Japan:+Japan+International+Cooperation+Agency+\(JICA\).&spell=1&sa=X&ei=veGeUZLAE5PS9QTemICACw&ved=0CCYQB SgA&bav=on.2,or.r\\_cp\\_r\\_qf.&bvm=bv.47008514,d.eWU&fp=c618e1d0efc5e7cb&biw=1280&bih=699](https://www.google.com.co/webhp?source=search_app#q=JICA.+(1992).+Study+on+Air+Pollution+Control+Plan+in+Santa+Fe+de+Bogota+City+Are,+Final+Report.+Tokyo,+Japan:+Japan+International+Cooperation+Agency+(JICA).&spell=1&sa=X&ei=veGeUZLAE5PS9QTemICACw&ved=0CCYQB SgA&bav=on.2,or.r_cp_r_qf.&bvm=bv.47008514,d.eWU&fp=c618e1d0efc5e7cb&biw=1280&bih=699)

## Anexo A: Graficas resumen de datos estaciones de la RMCAB

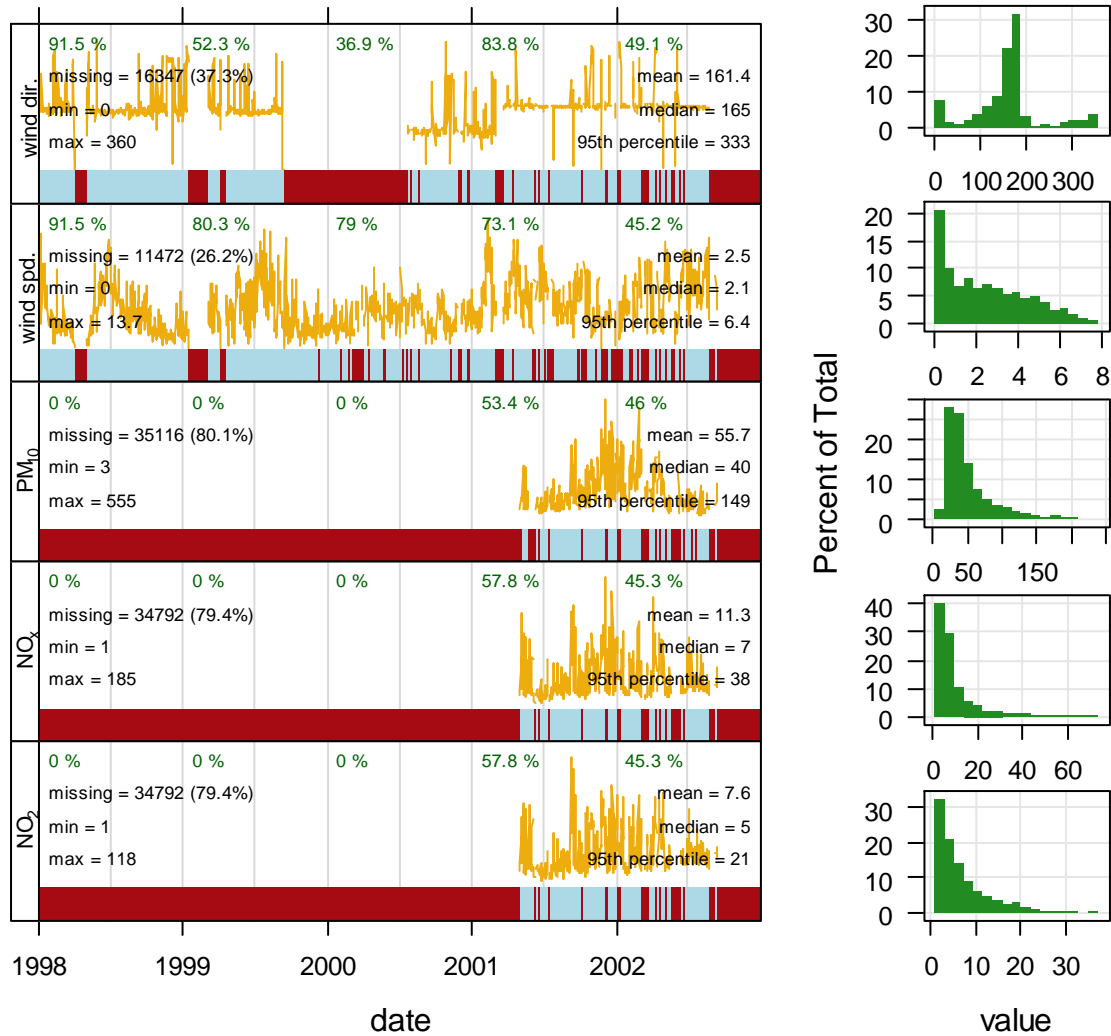
## Carvajal



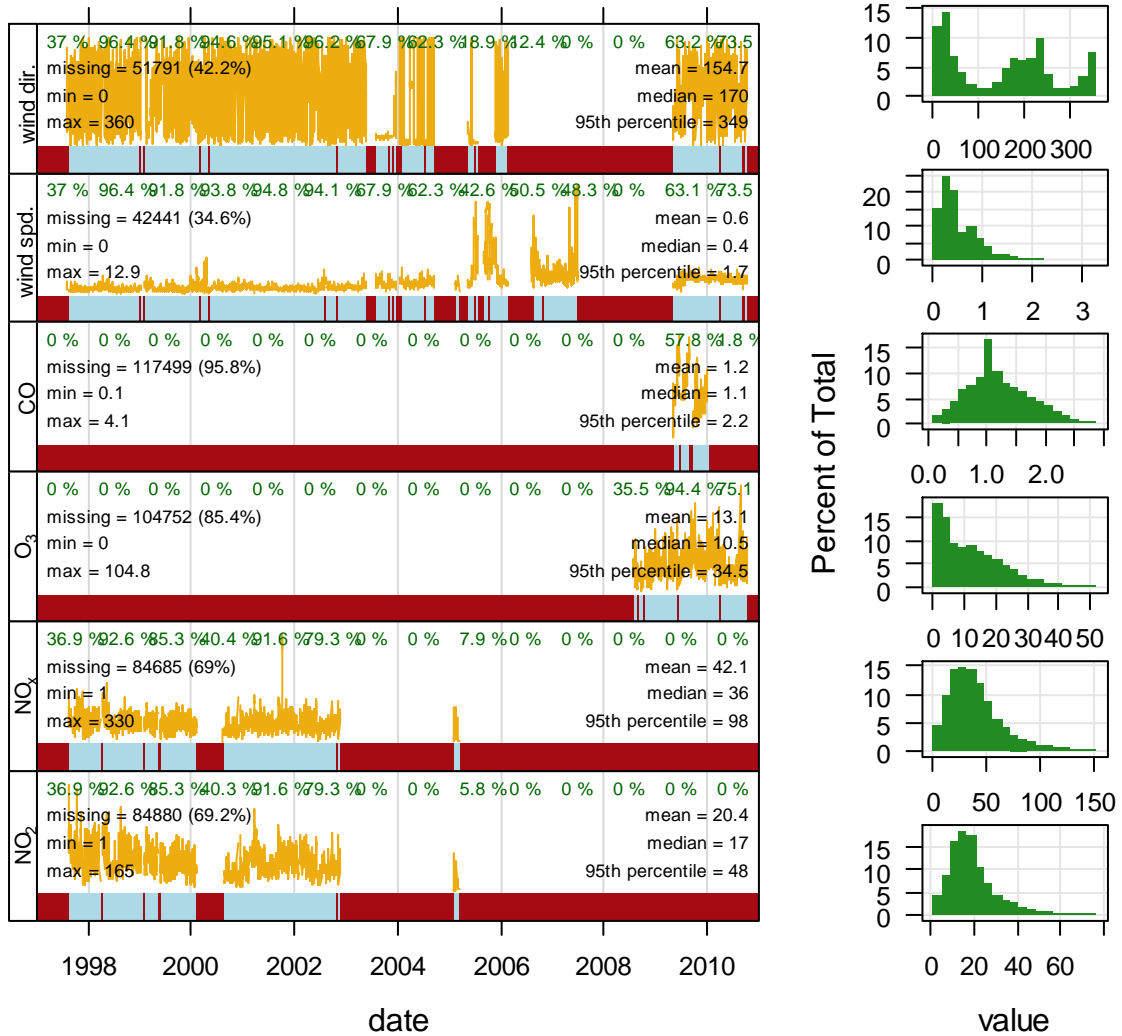
## Cazuca



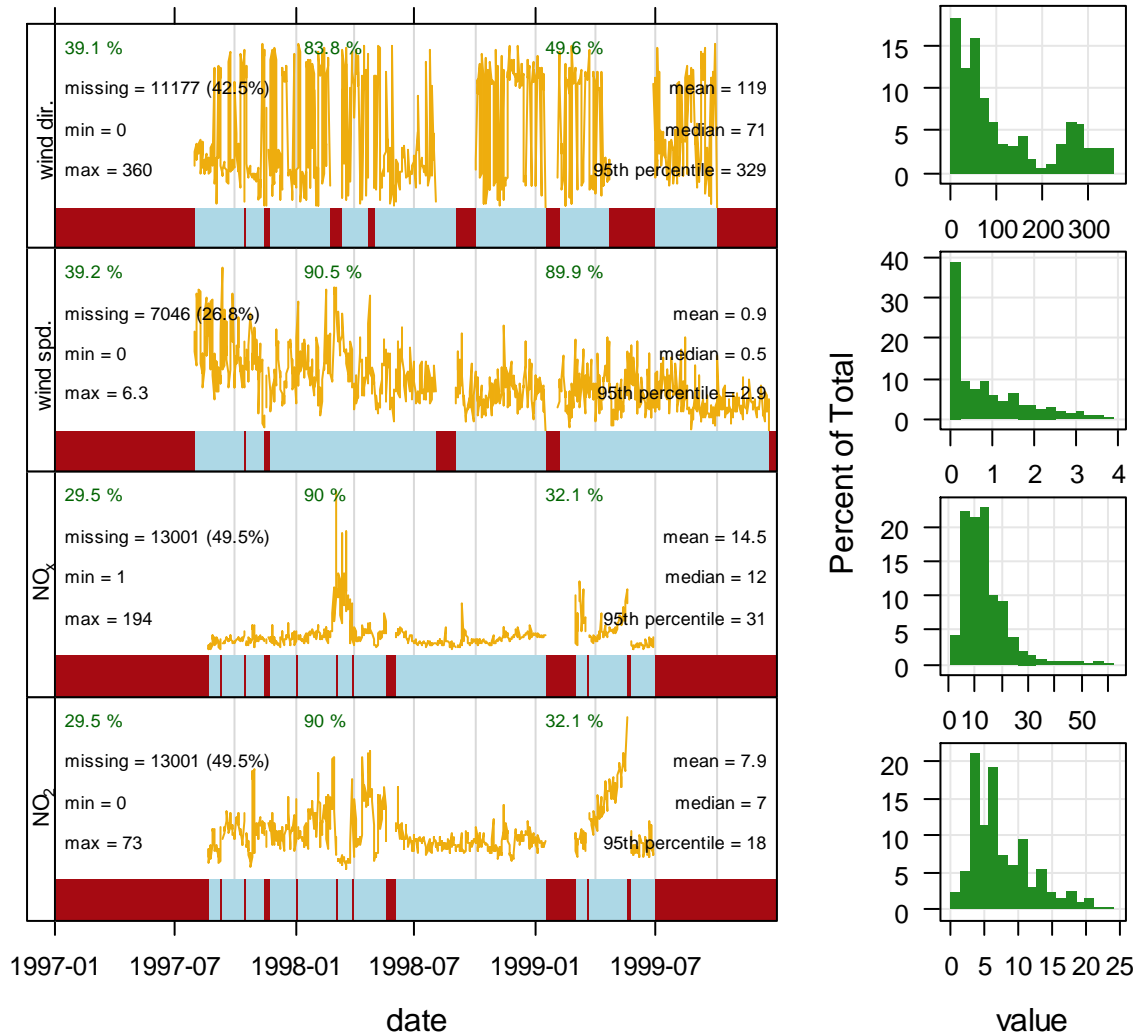
## Central de Mezclas



## ChiCO

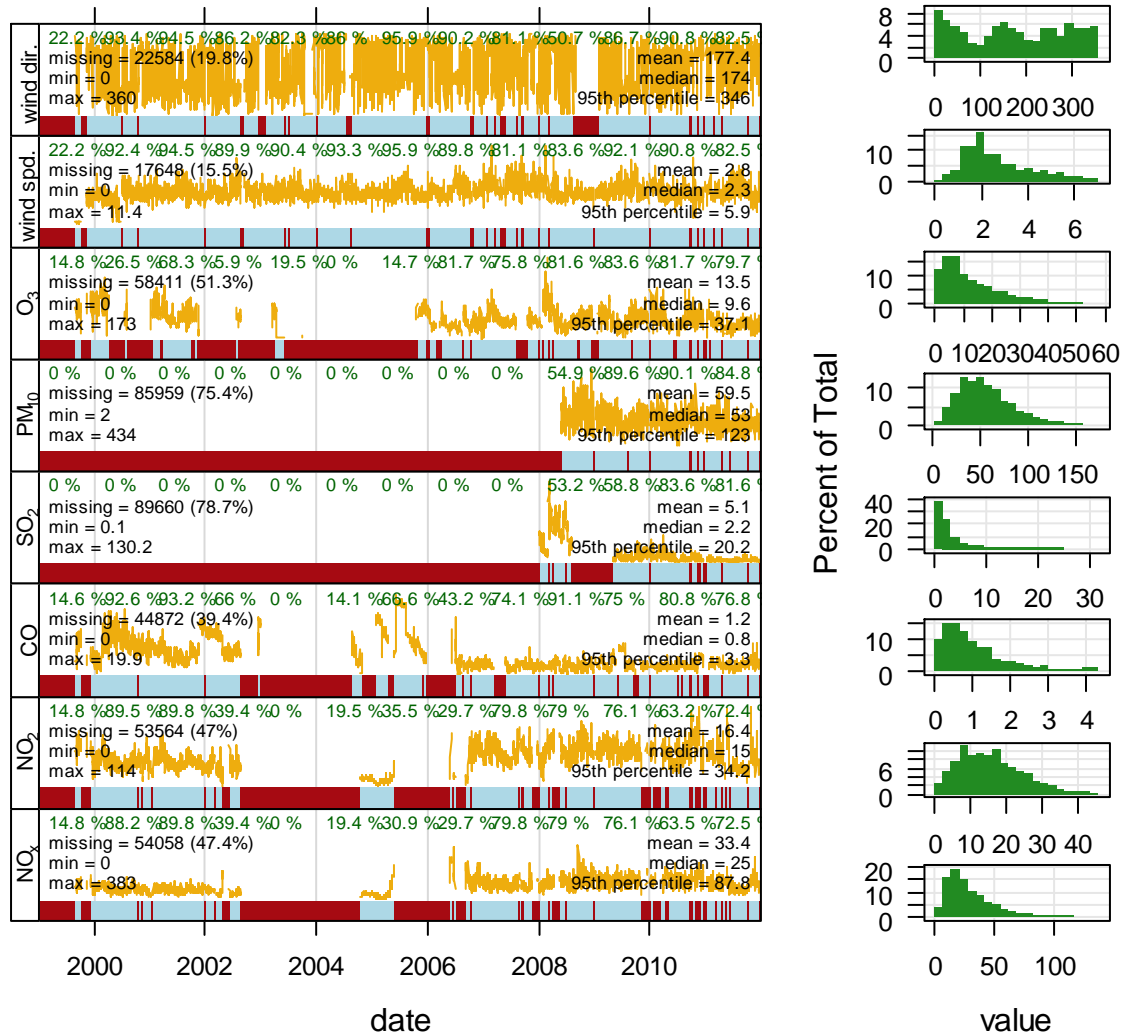


## Engativa

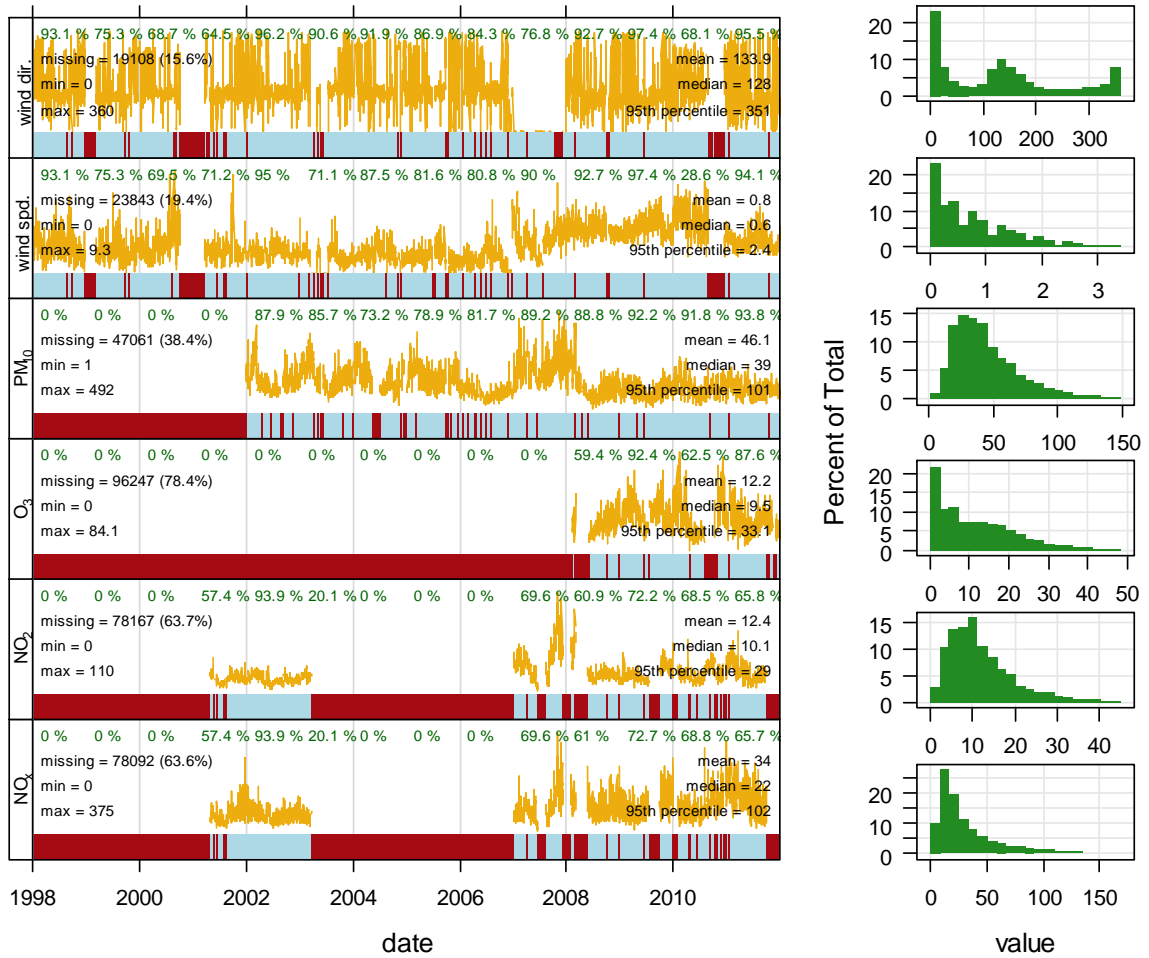




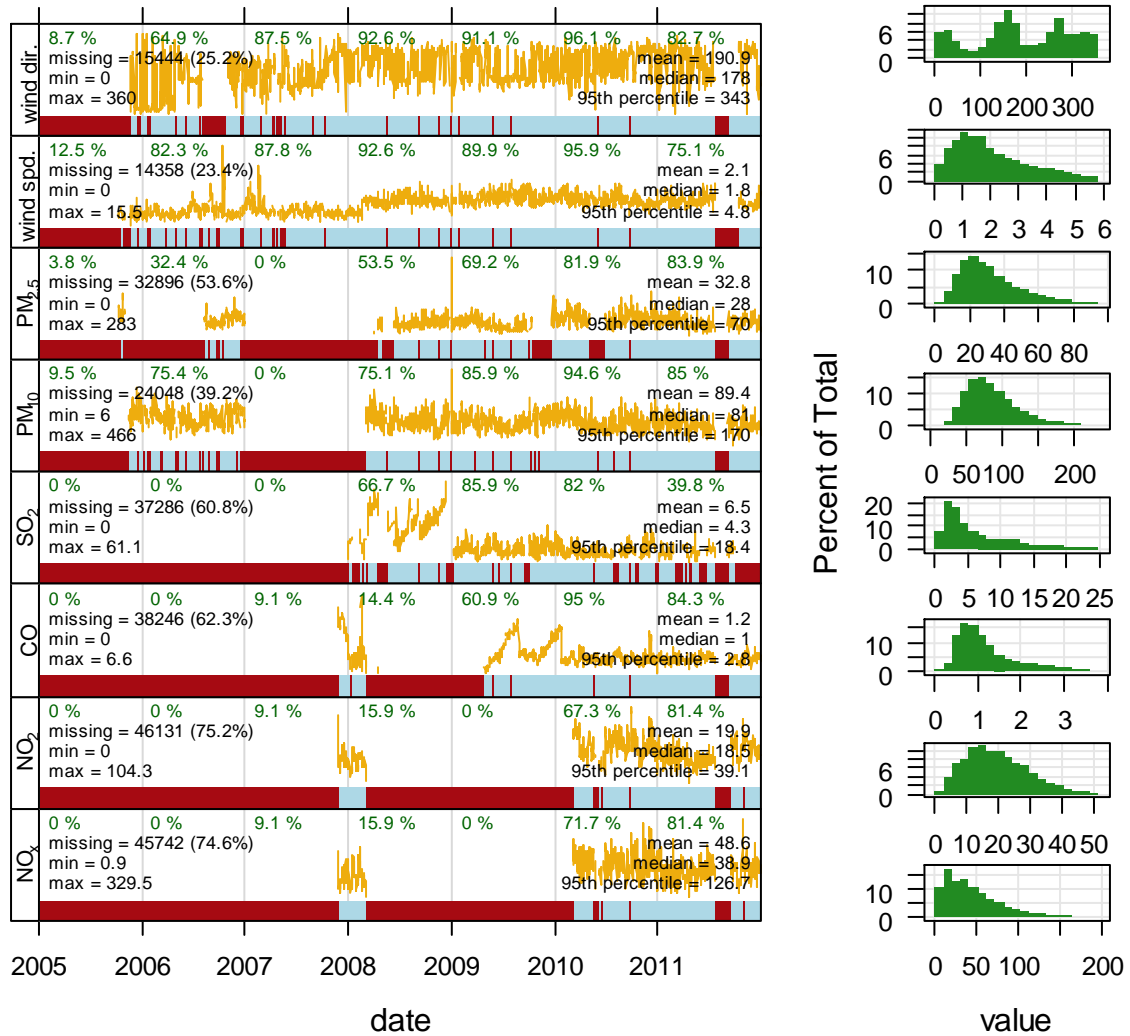
## Fontibon



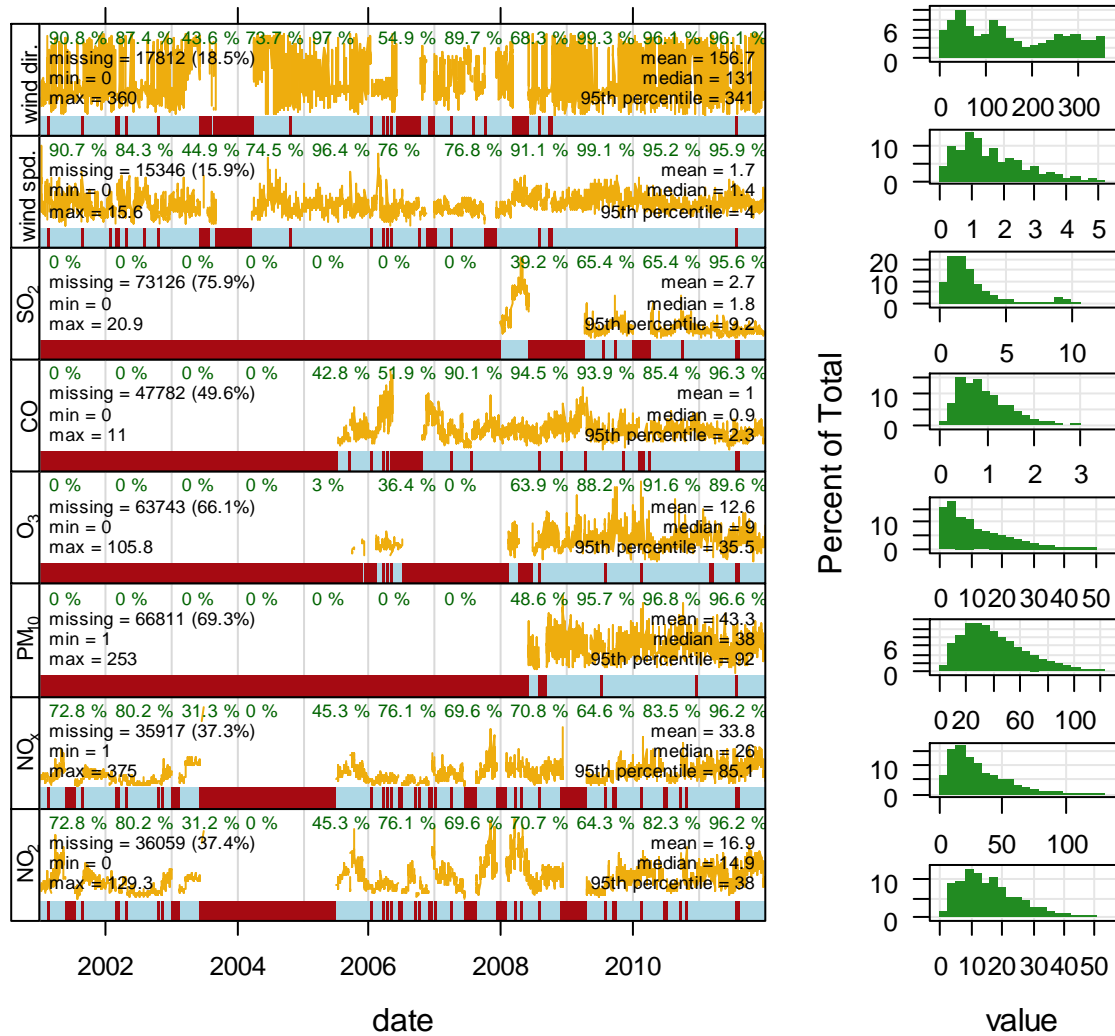
## Guaymaral



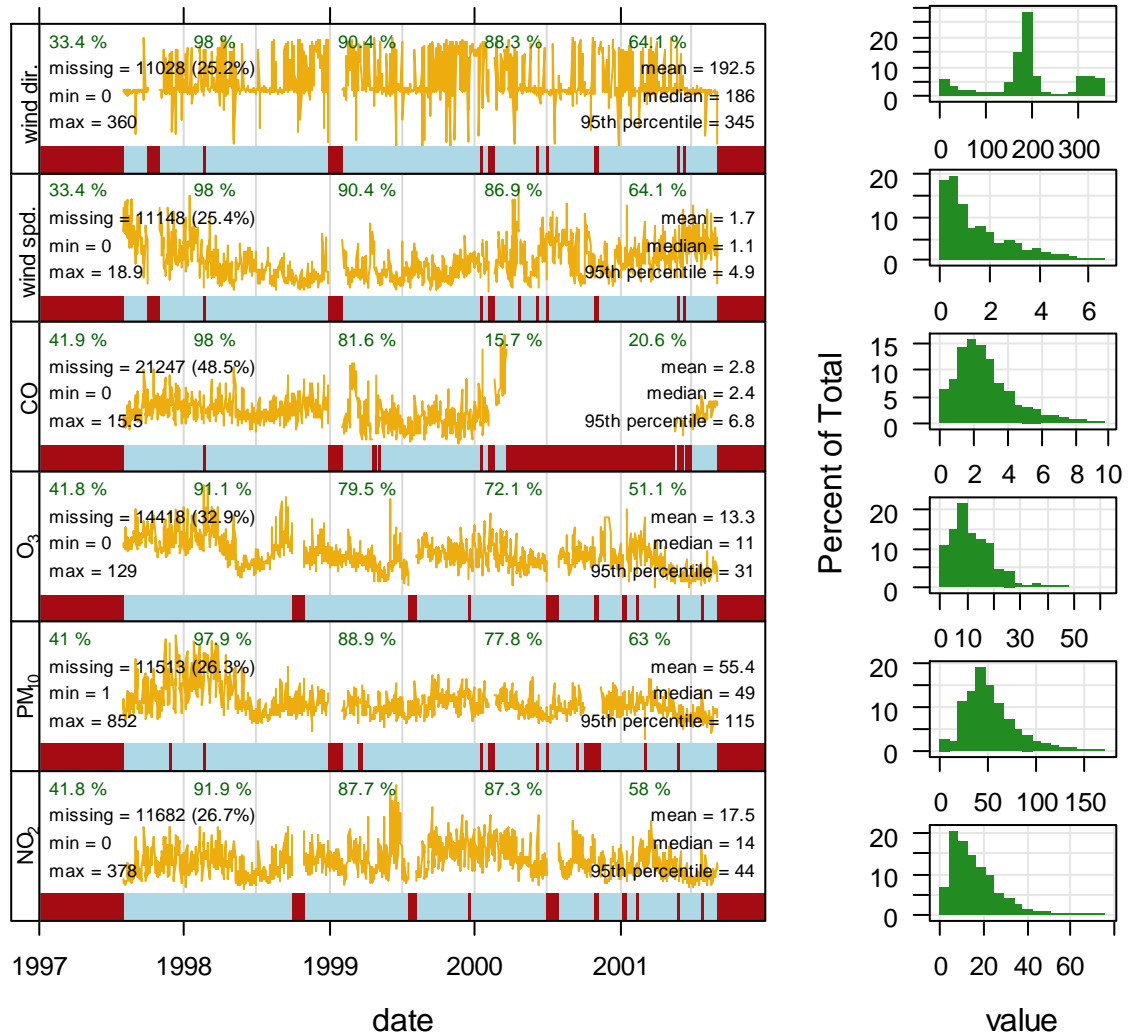
## Kennedy



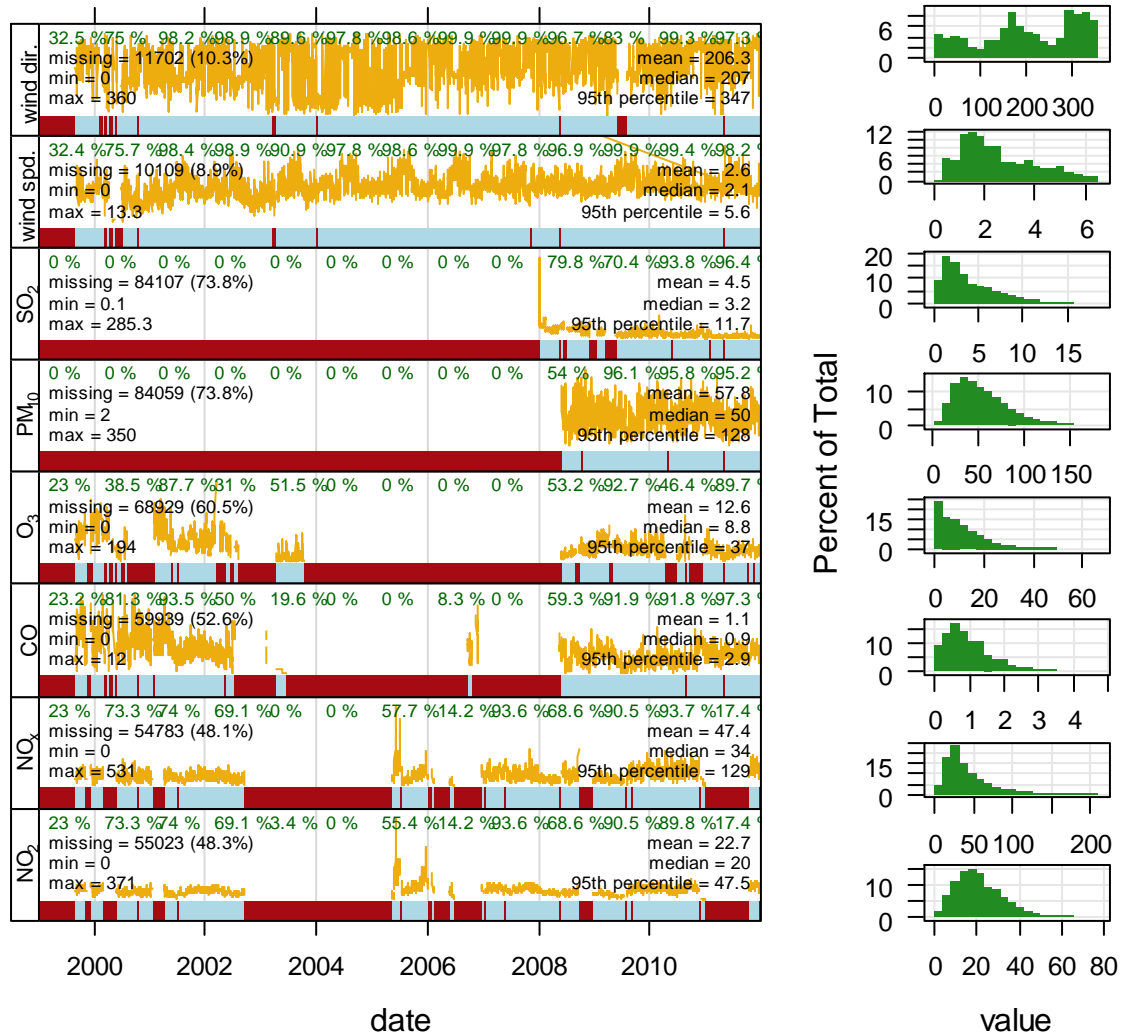
## Las Ferias



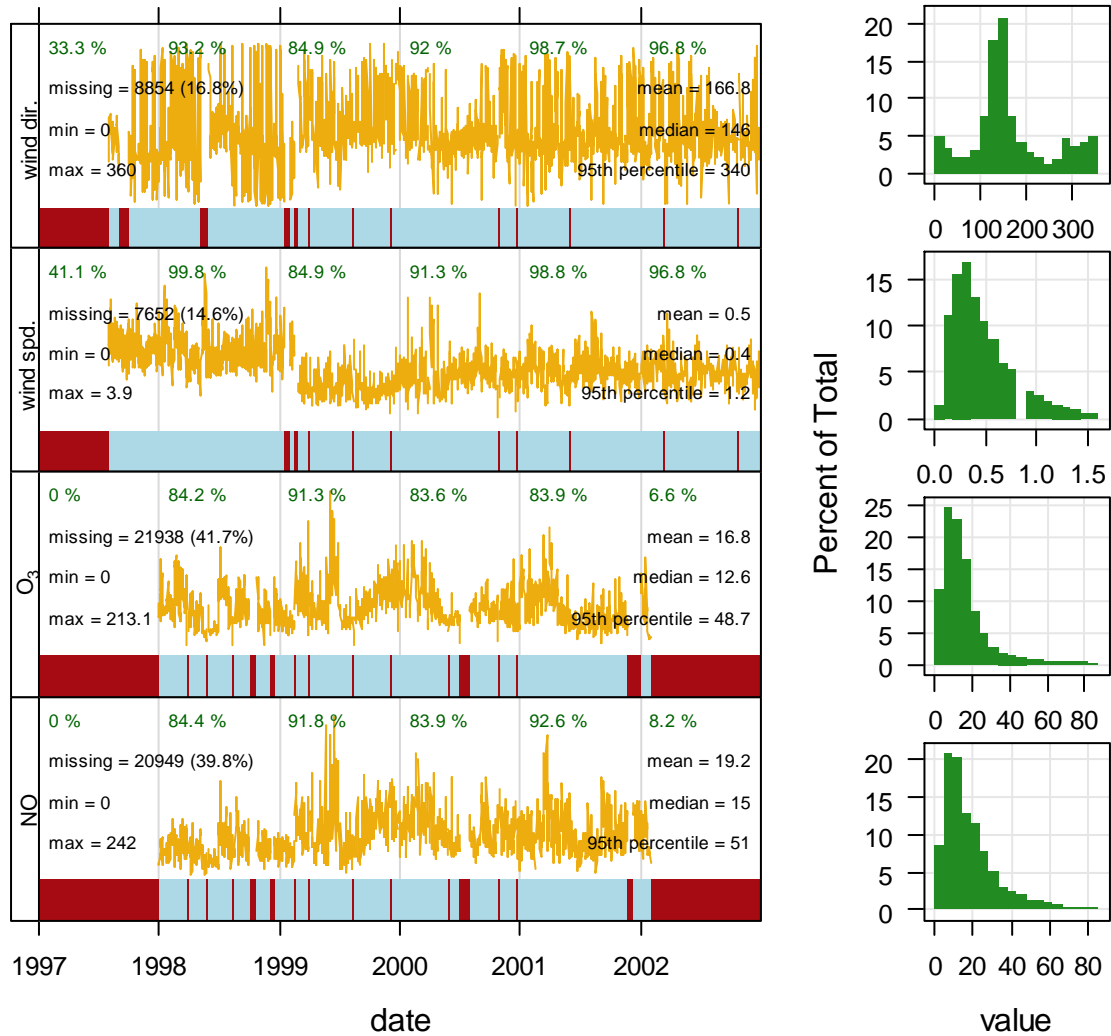
## Olaya



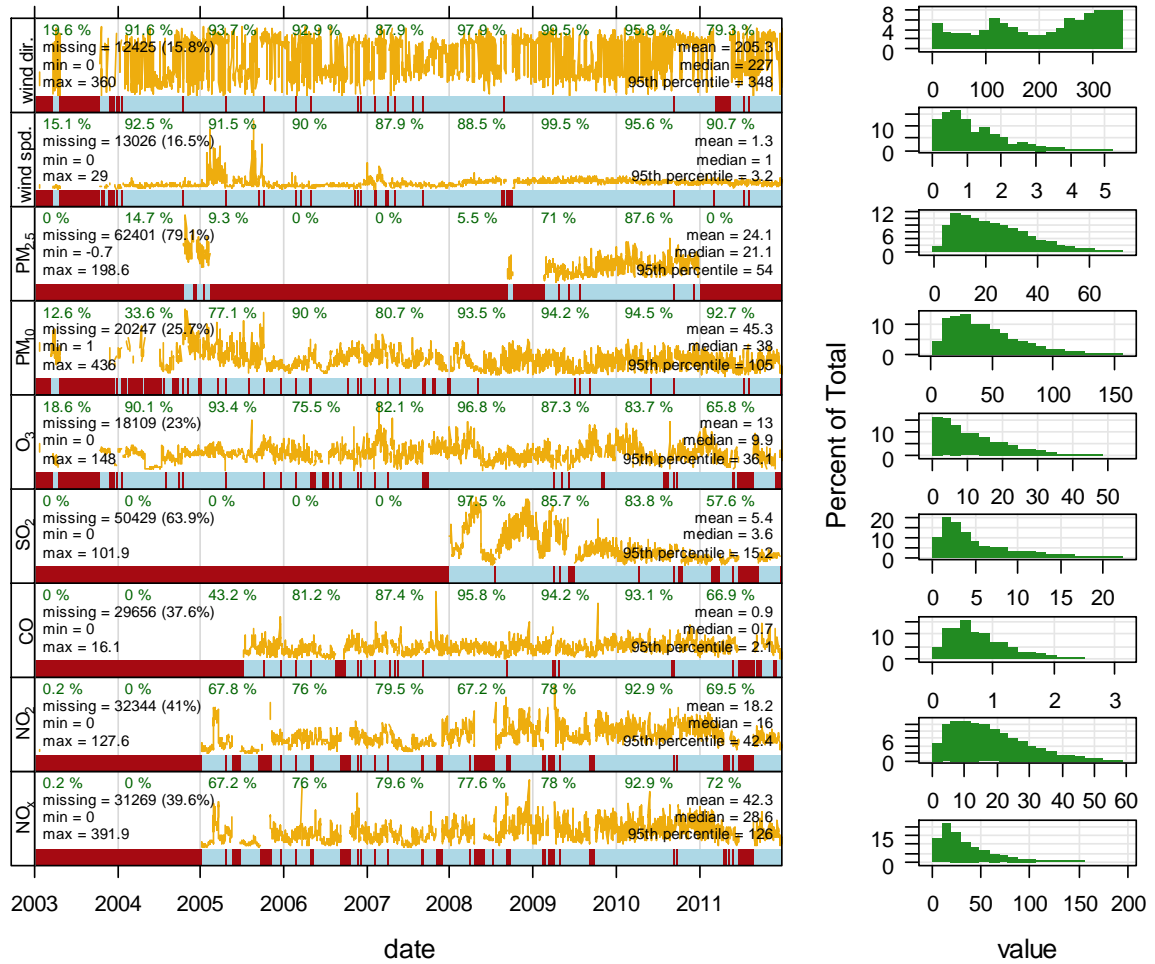
## Puente Aranda



## Sagrado Corazón

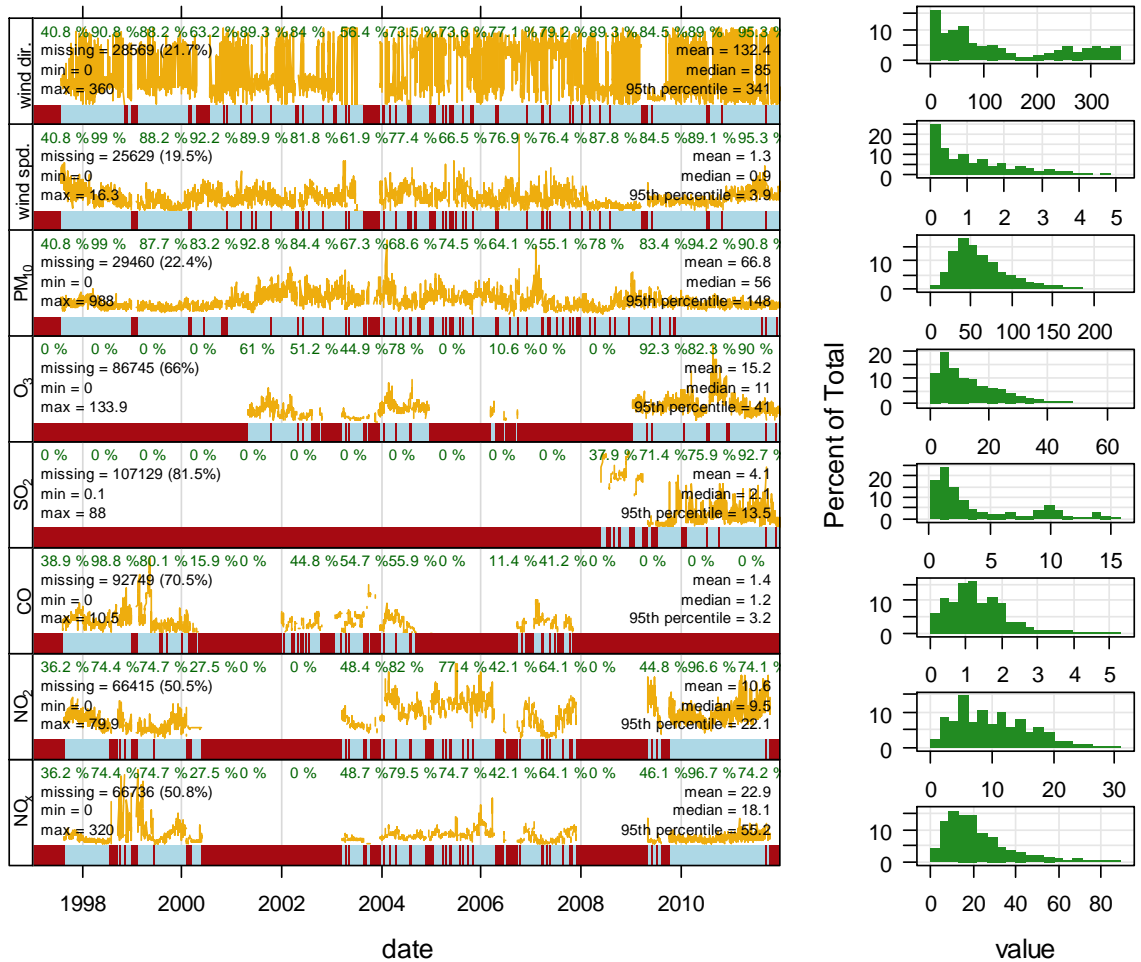


## Simón Bolívar

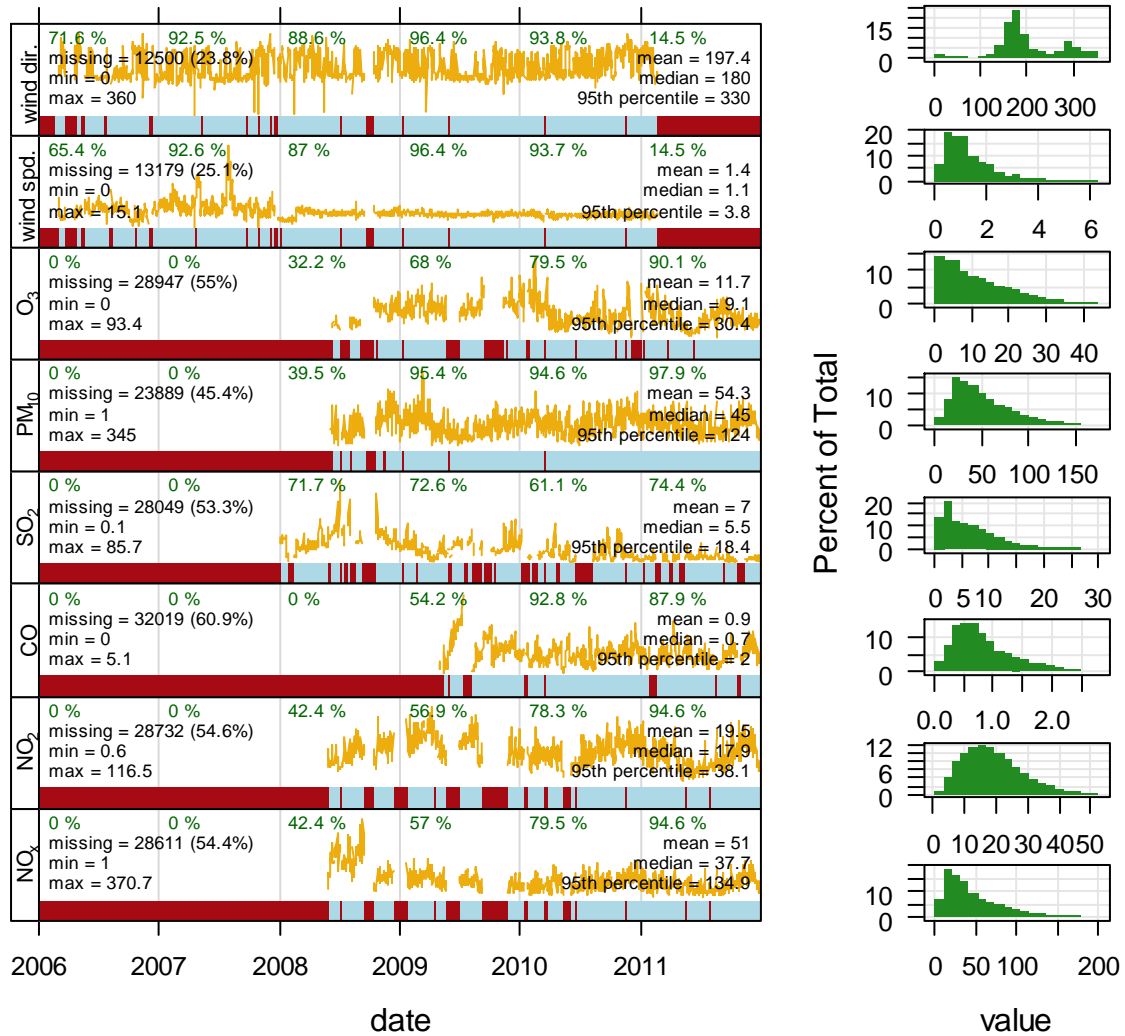




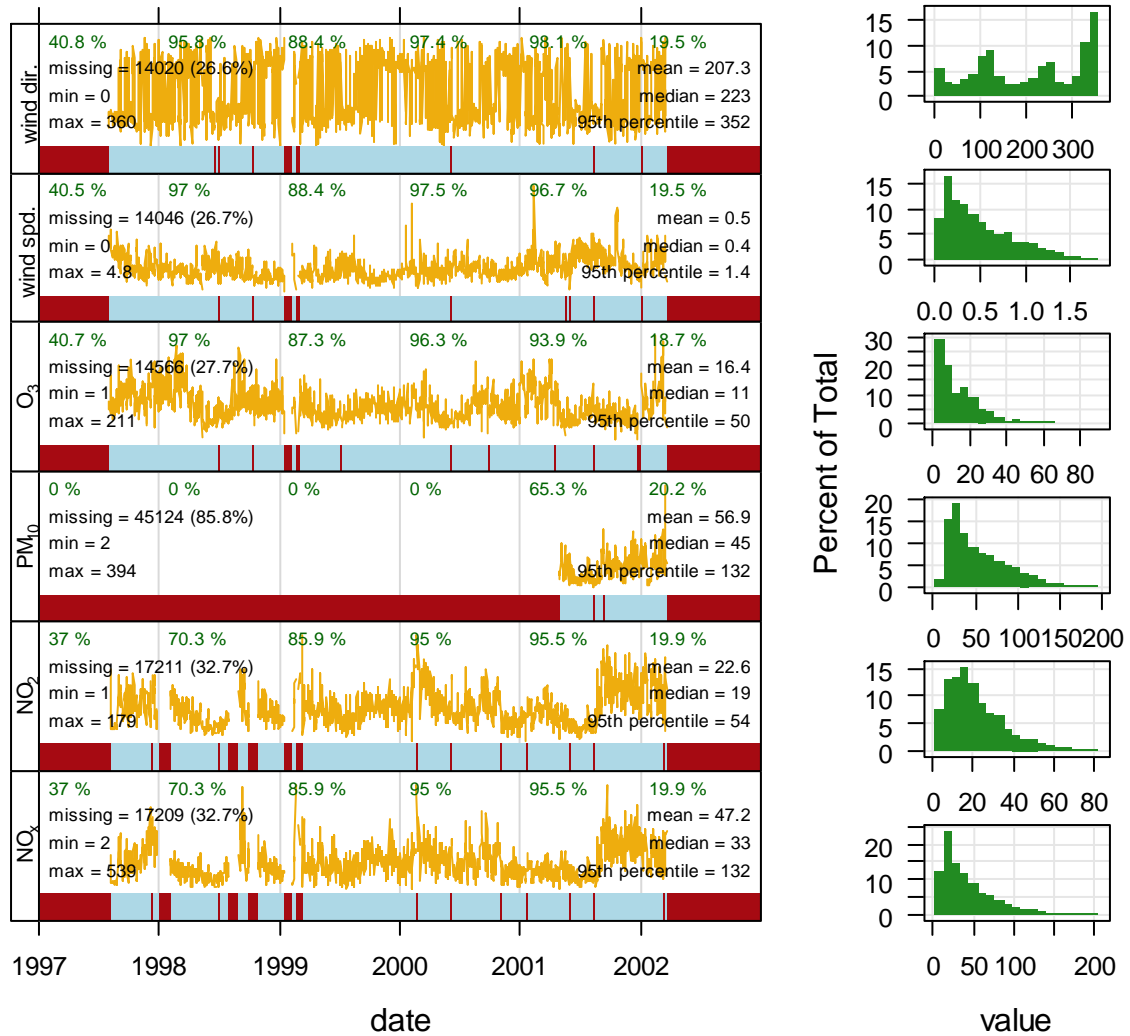
## Suba



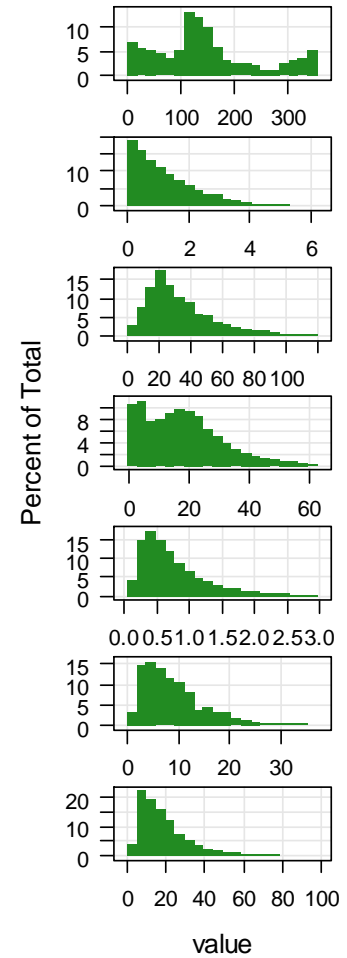
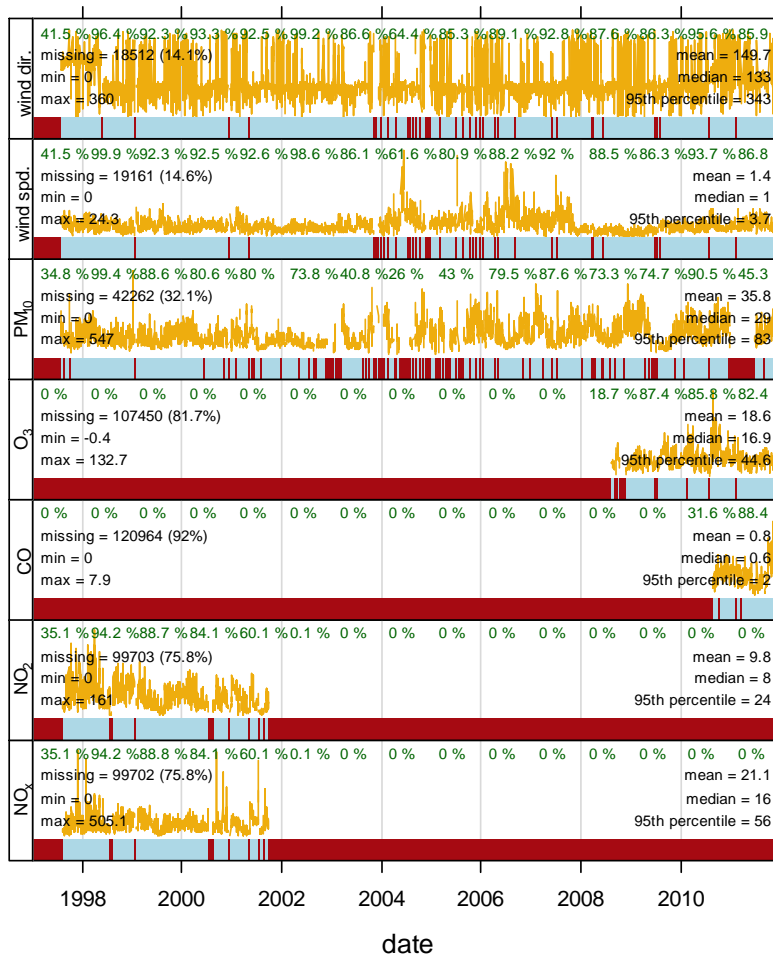
## Tunal



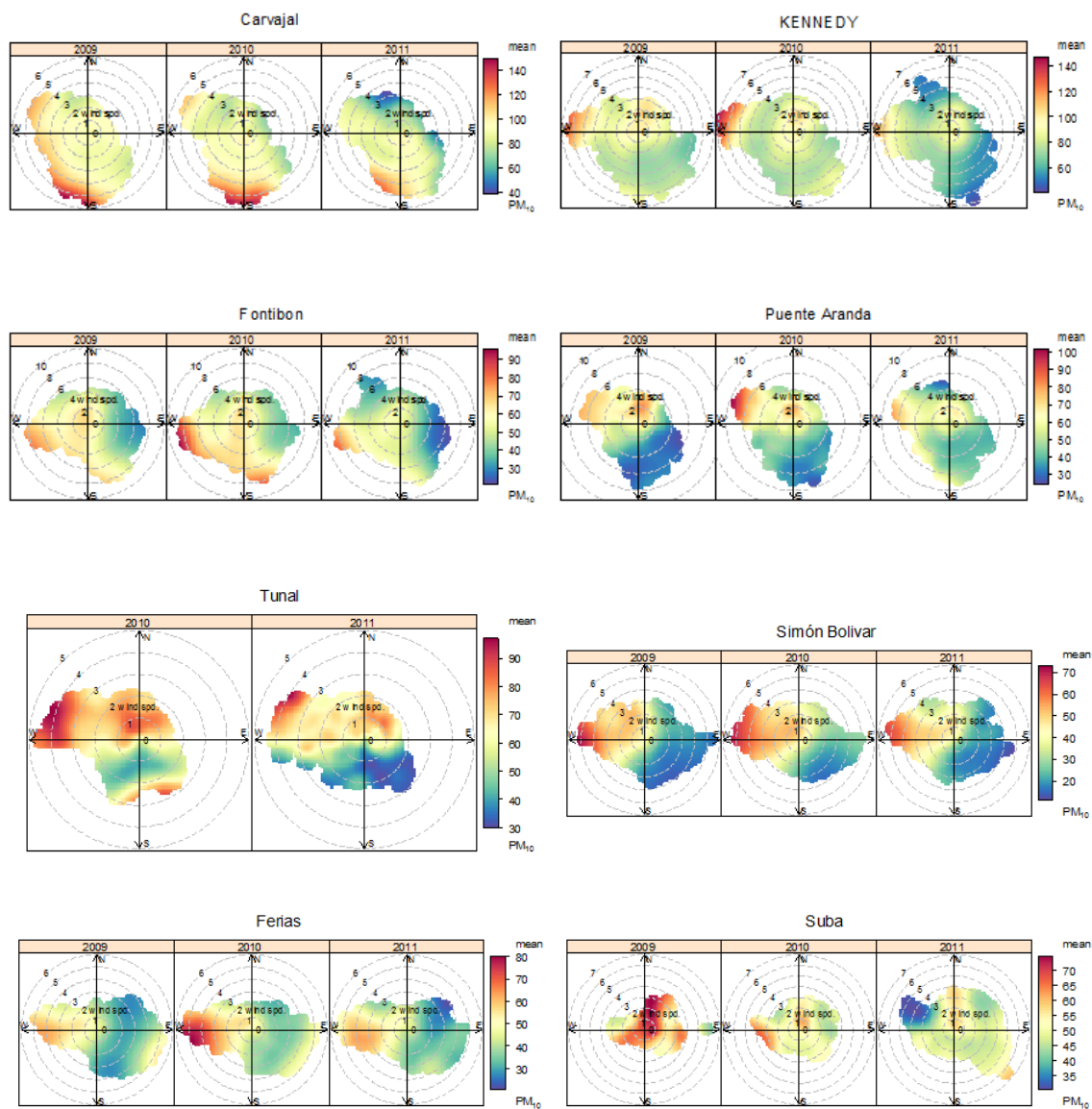
## Universidad Nacional

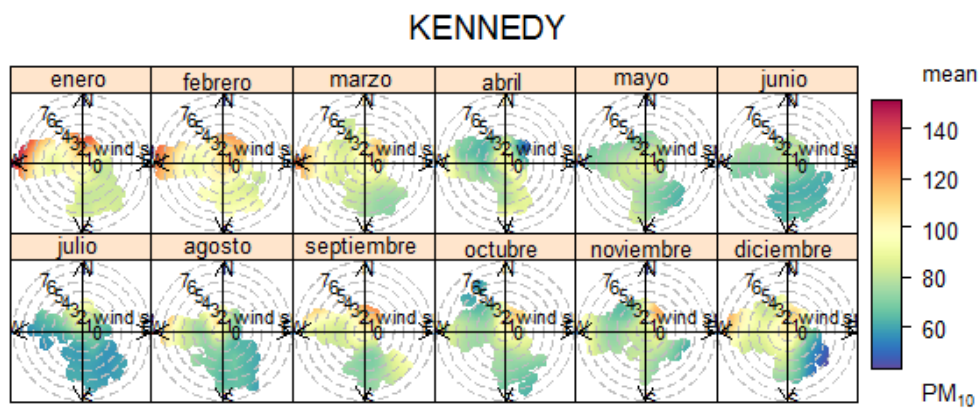
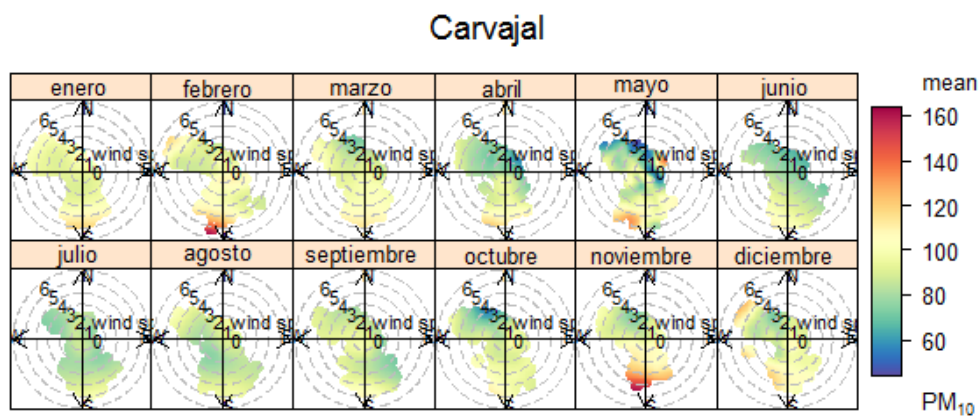
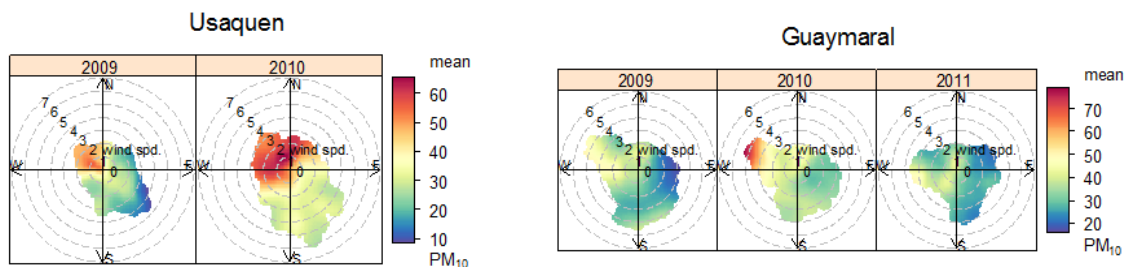


## Usaquén

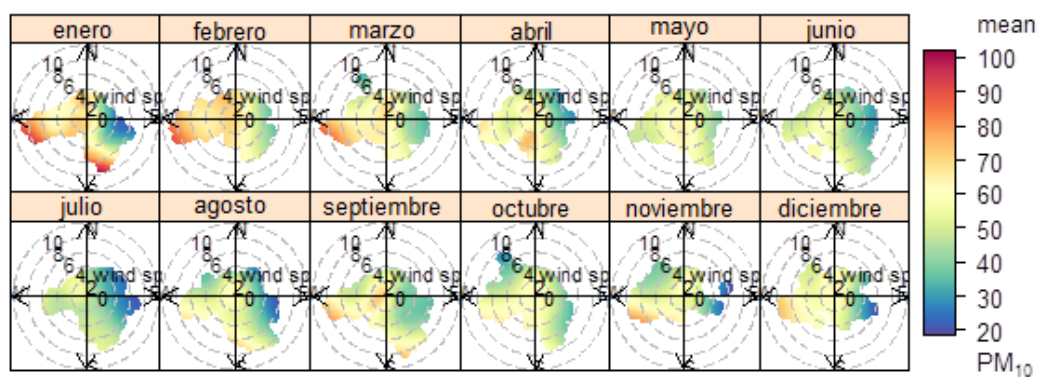


## Anexo B Gráficos polares de la concentración de $PM_{10}$ estaciones de la RMCAB

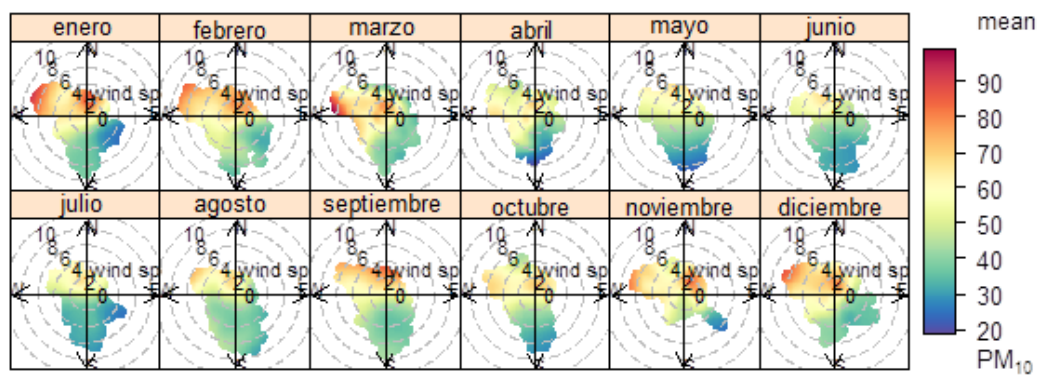




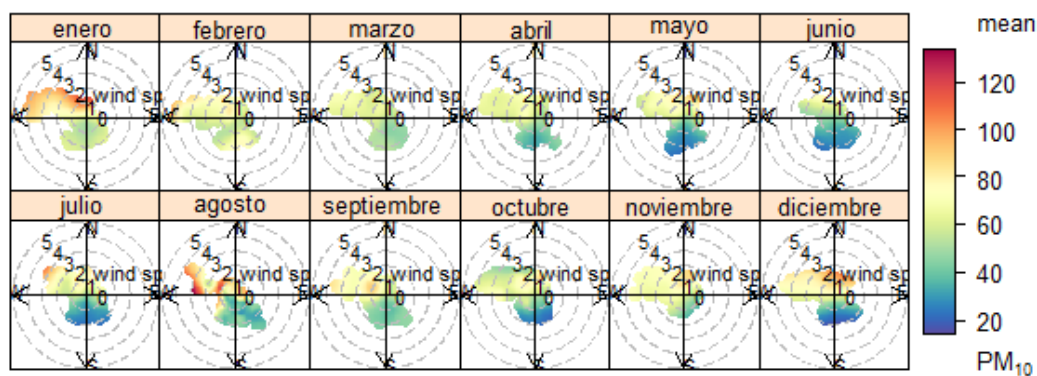
### Fontibon



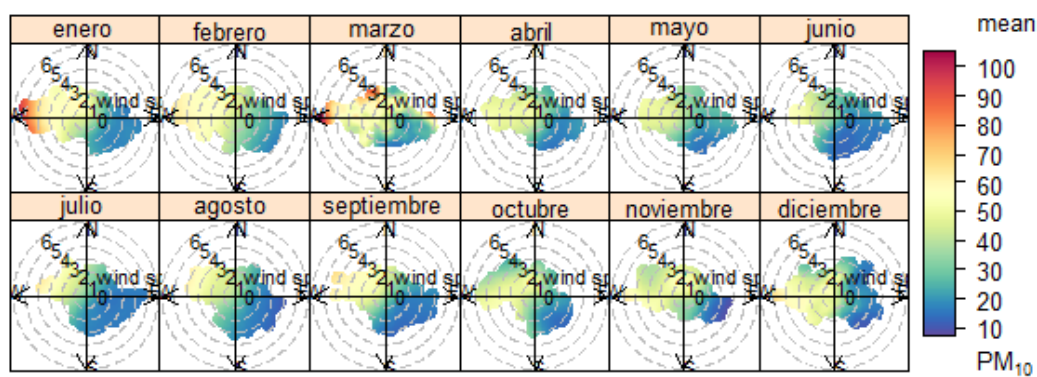
### Puente Aranda



### Tunal

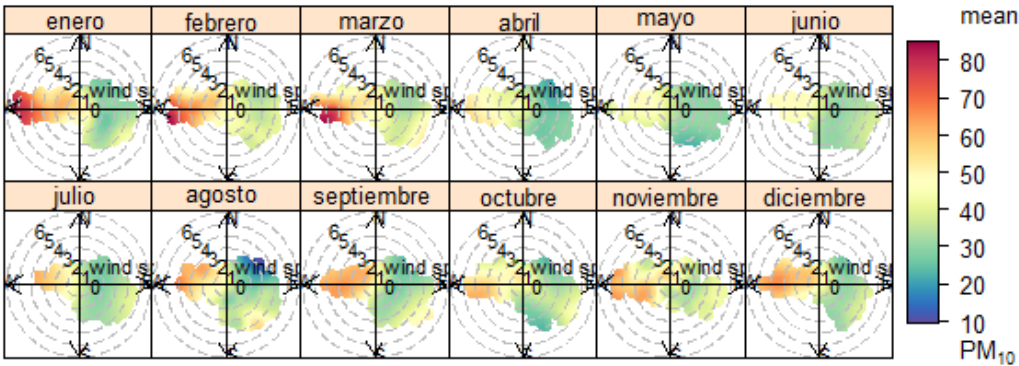


### Simón Bolívar

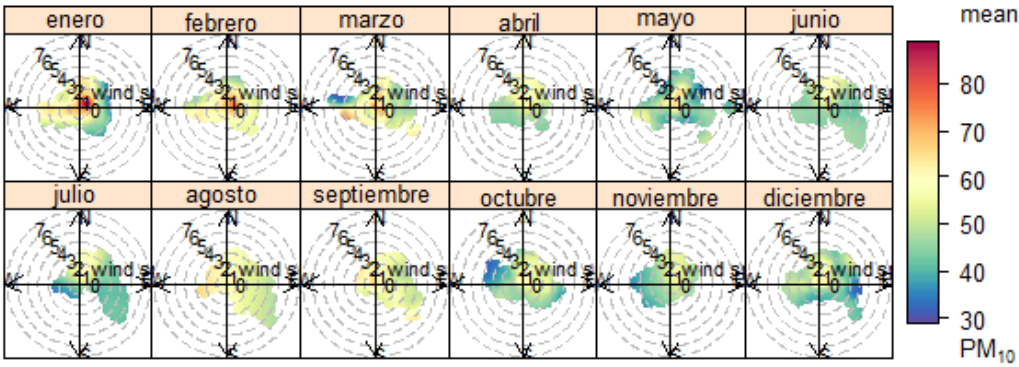




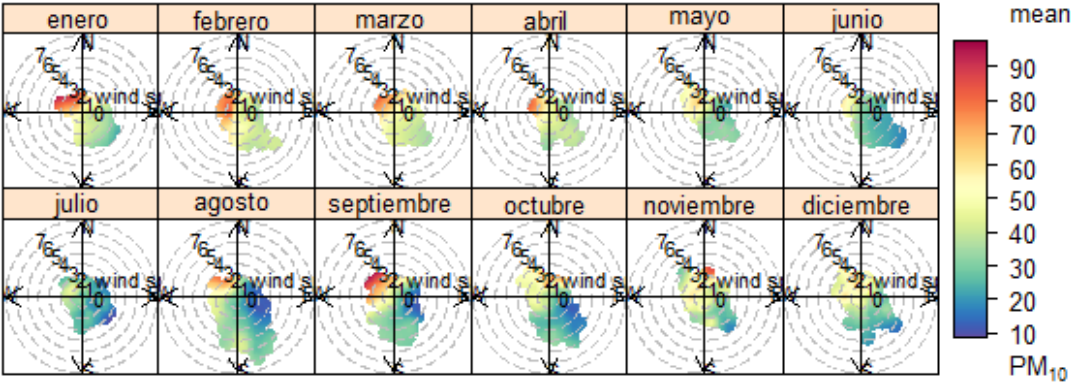
Ferias



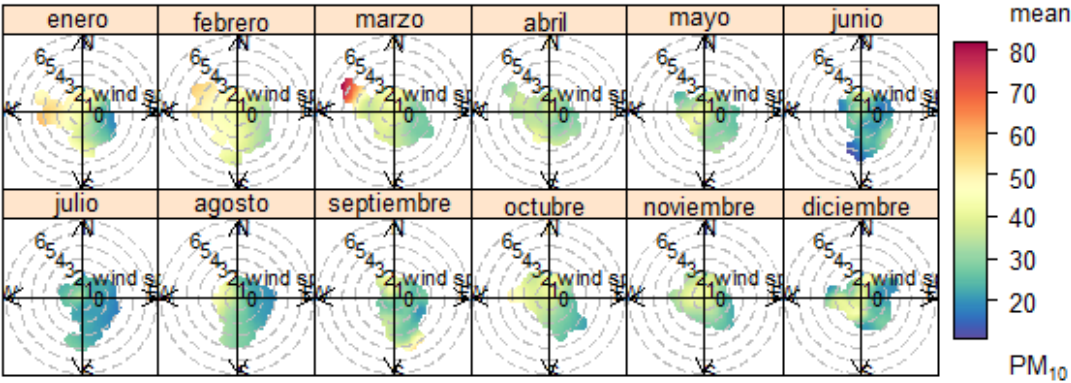
Suba



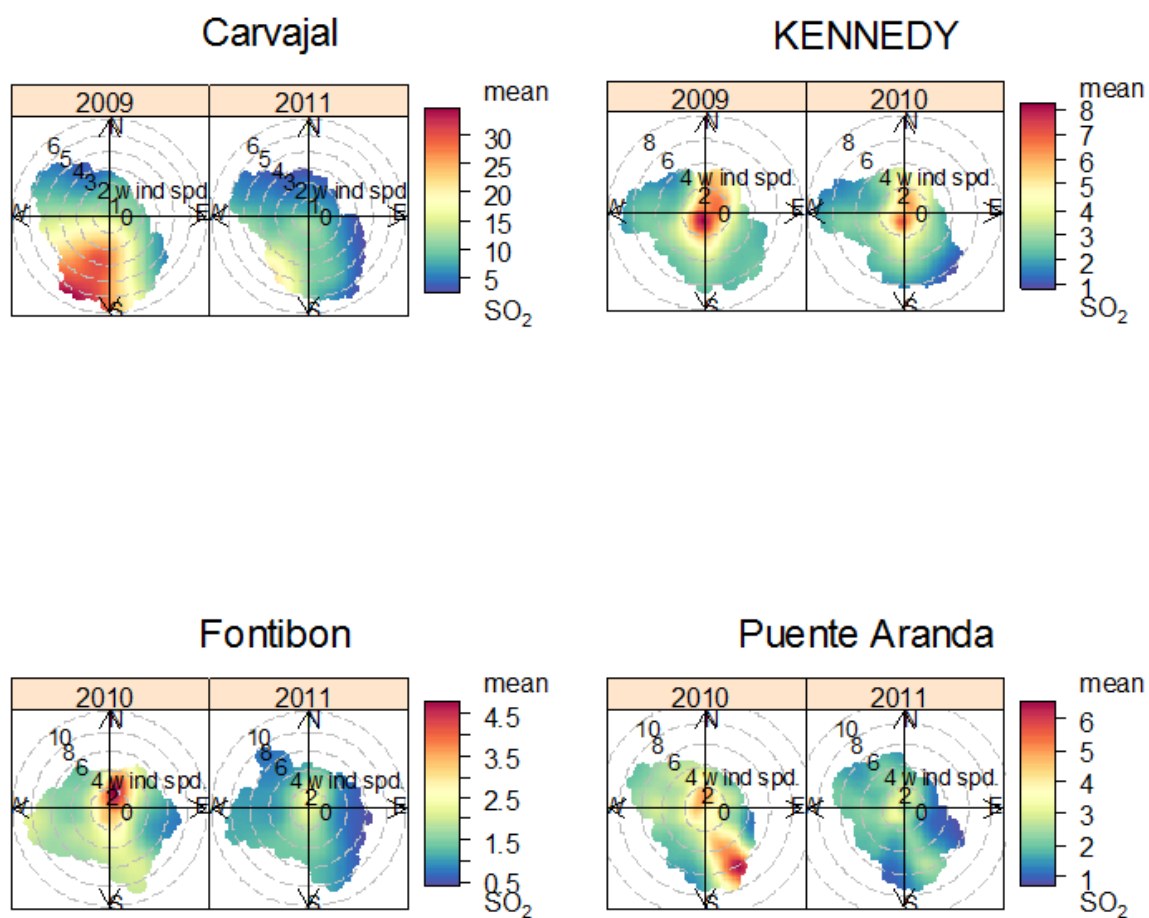
Usaquen

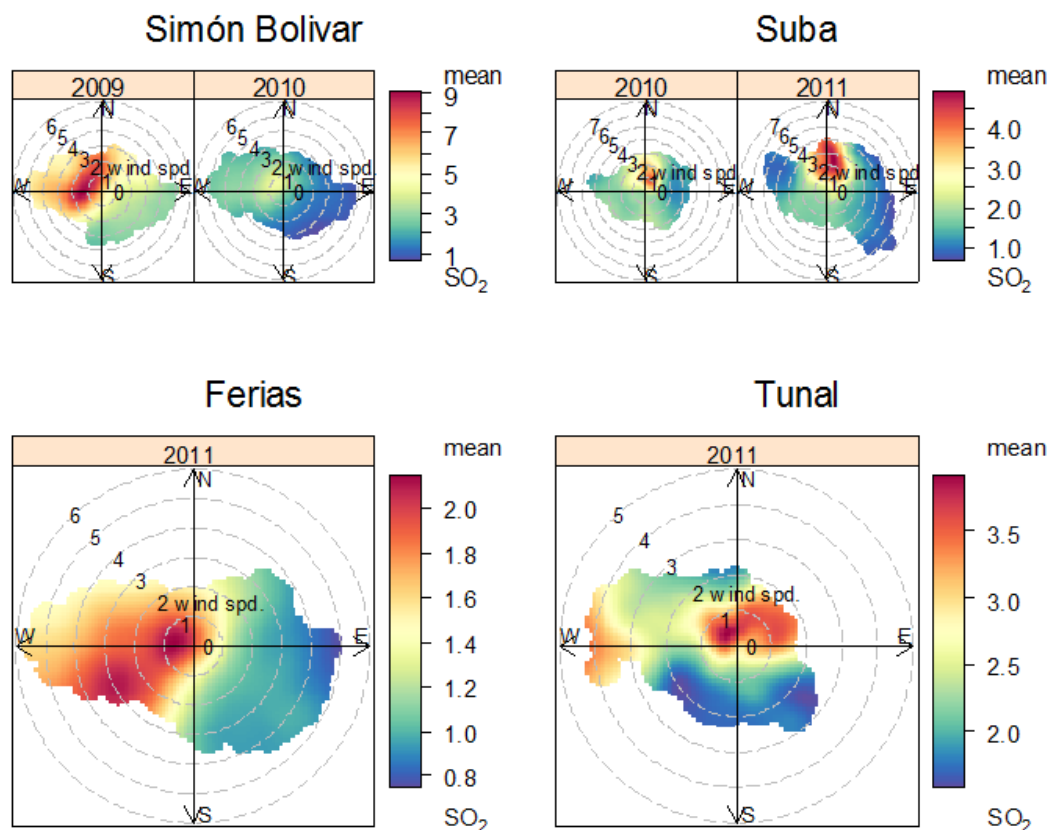


Guaymaral

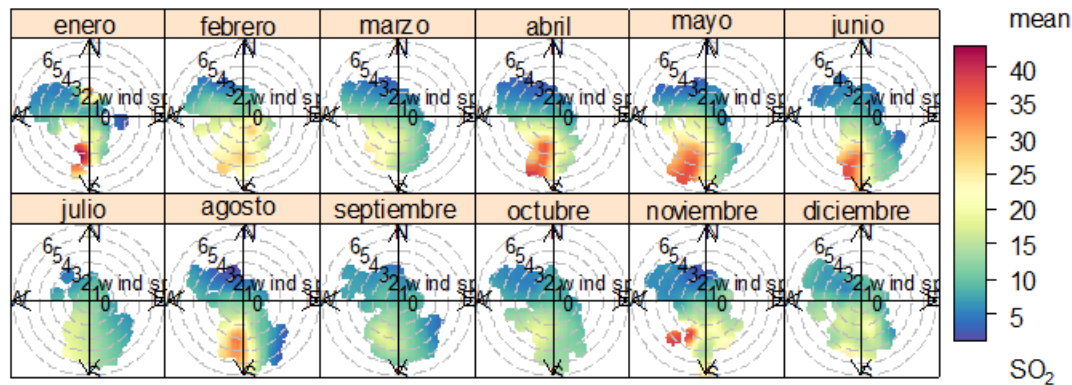


Anexo C: Gráfico polar de la concentración de SO

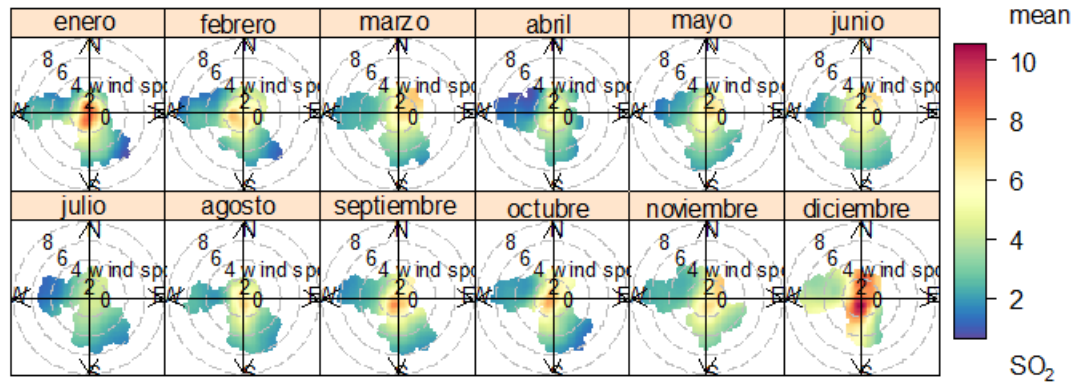




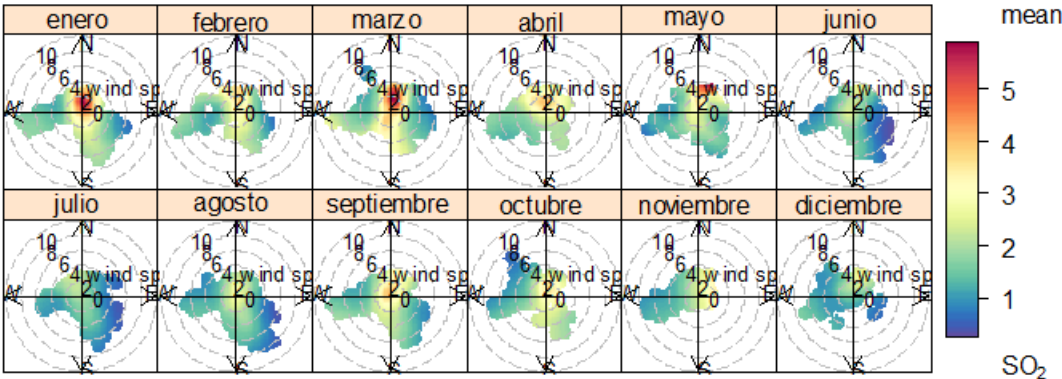
Carvajal



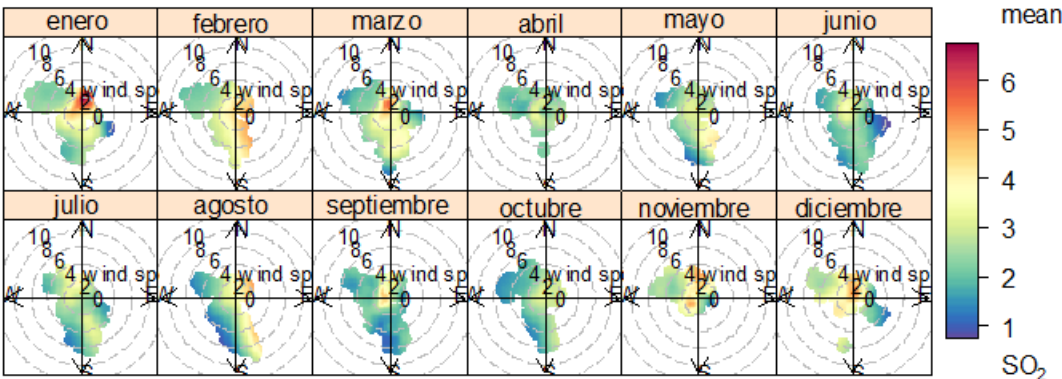
KENNEDY

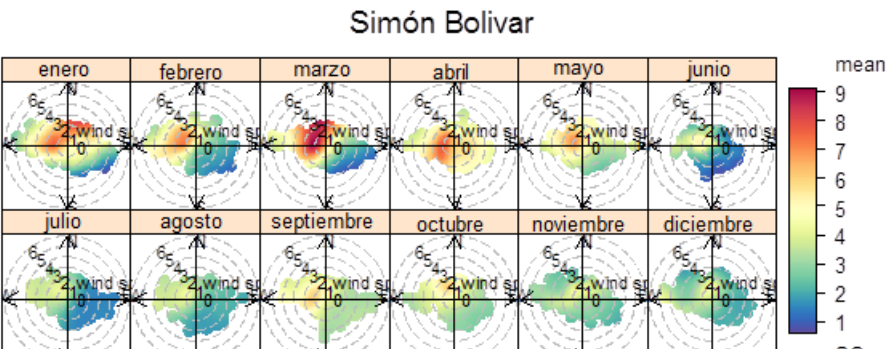
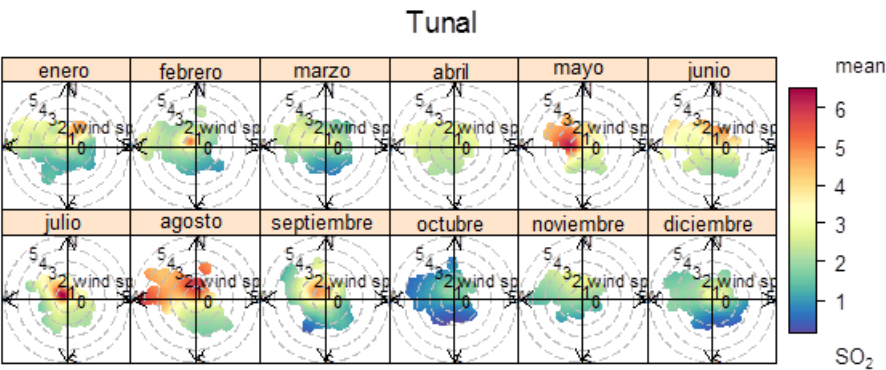


Fontibon



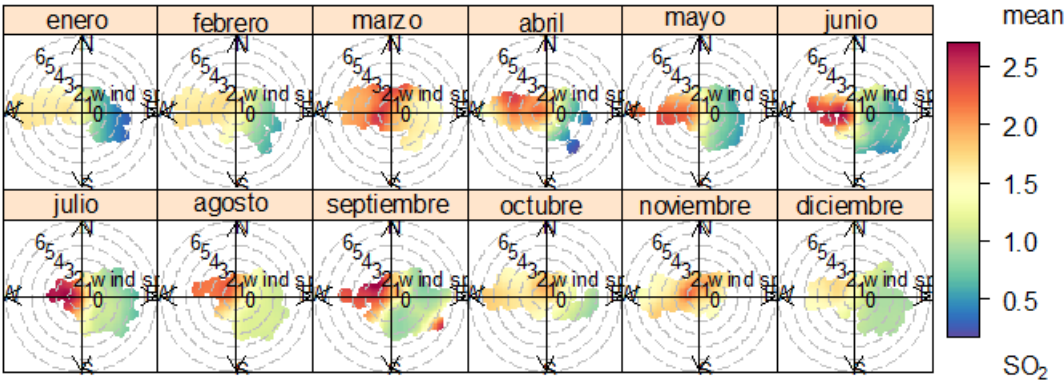
Puente Aranda



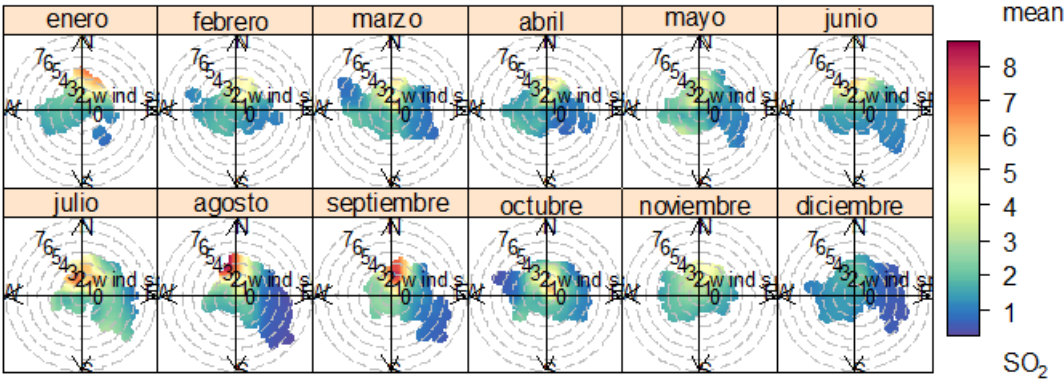




Ferias

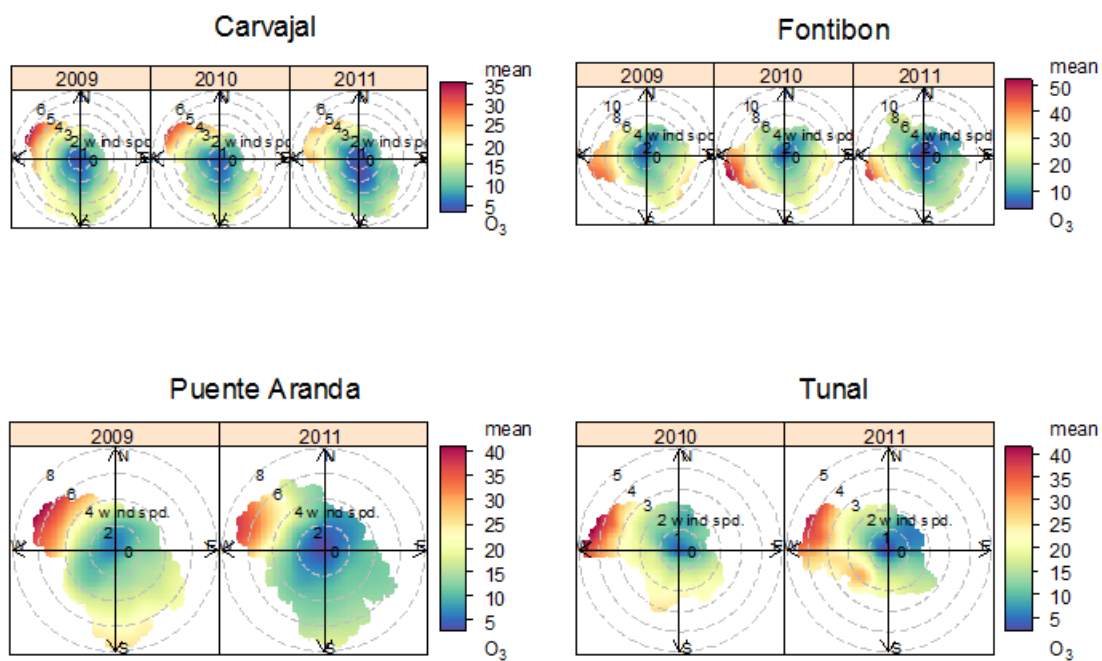


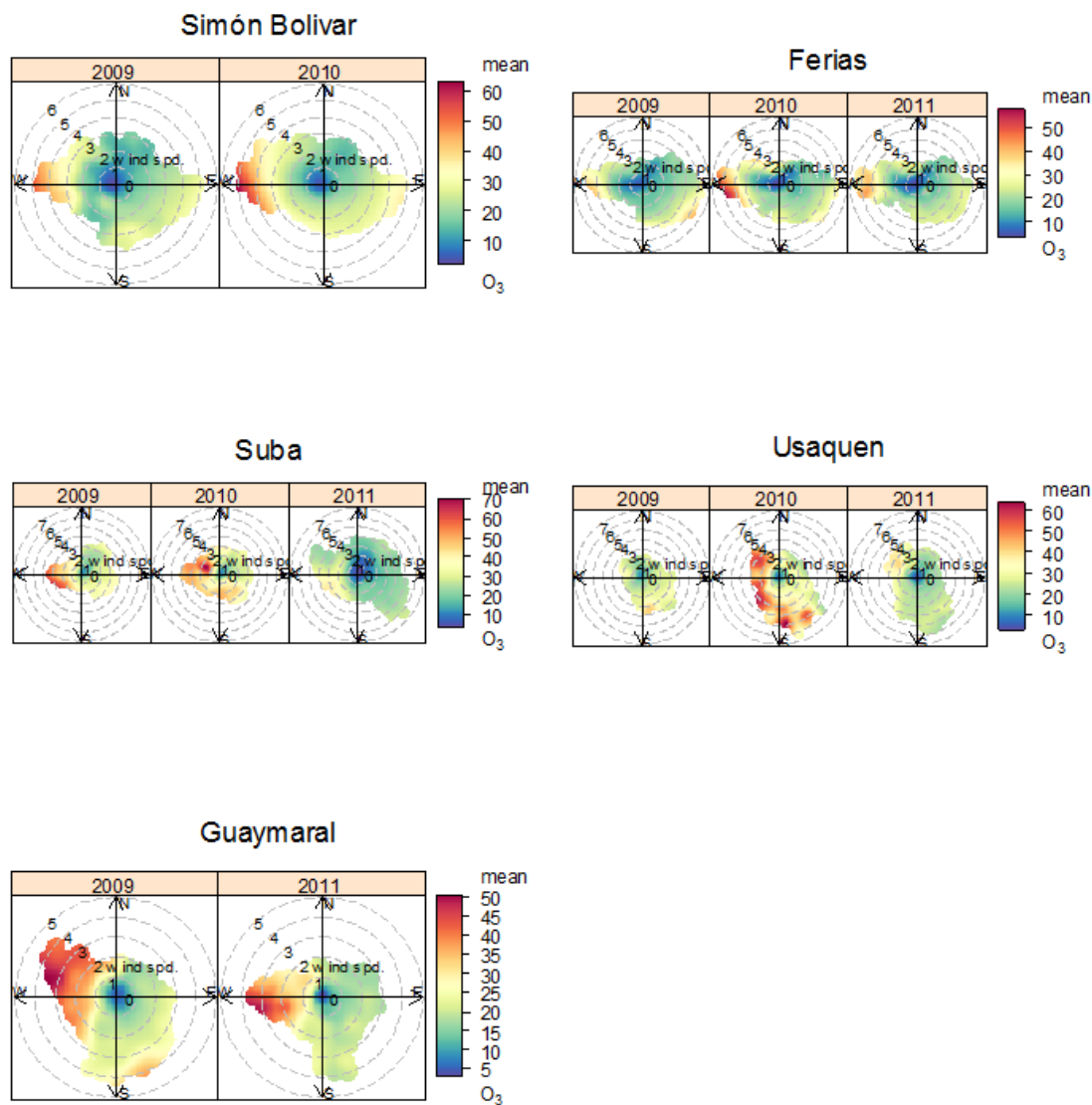
Suba



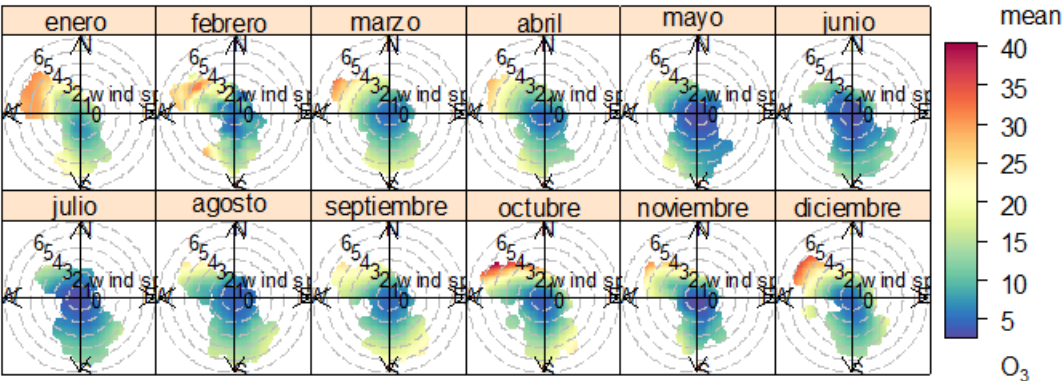


**Anexo D:** Gráfico polar de la concentración de ozono estaciones de la RMCAB

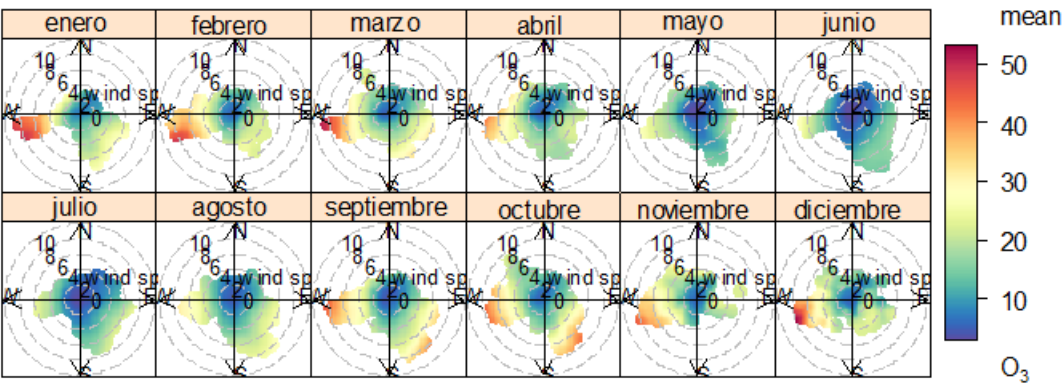




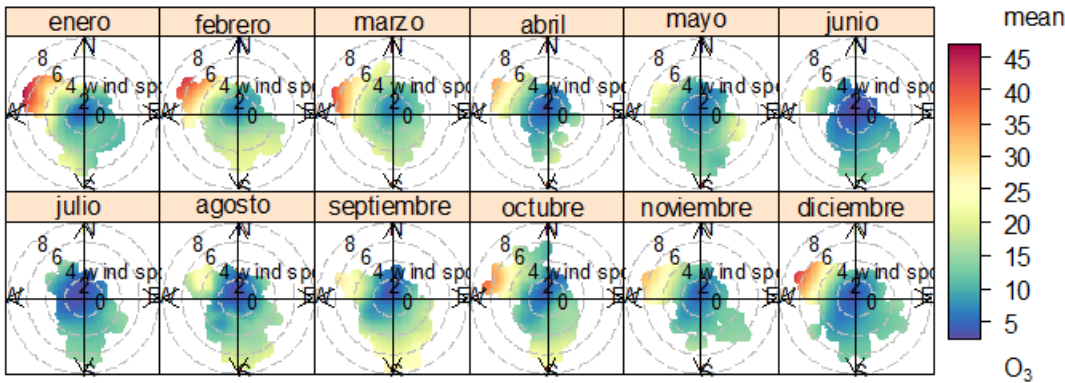
Carvajal



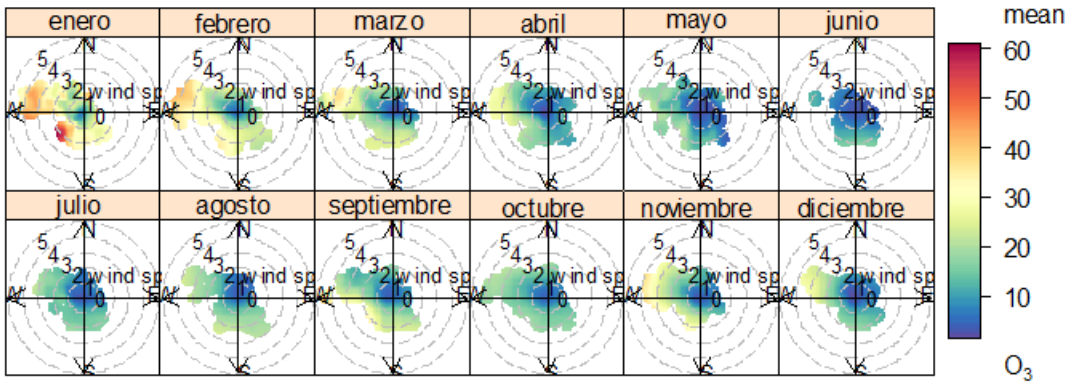
Fontibon



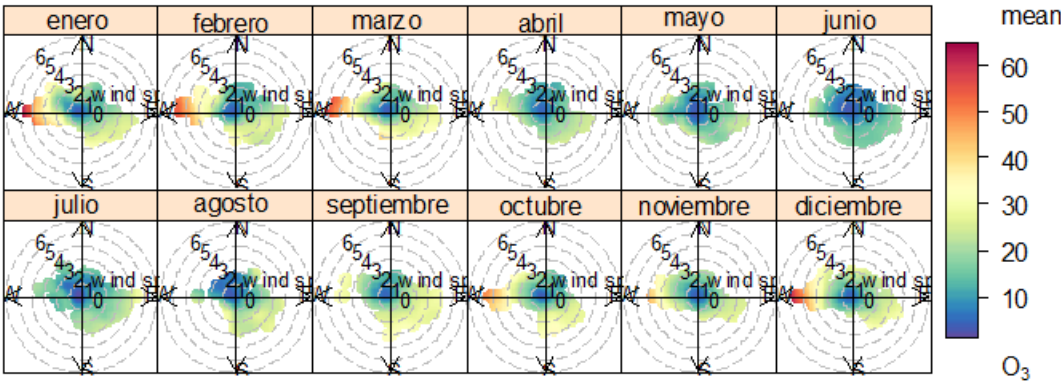
Puente Aranda



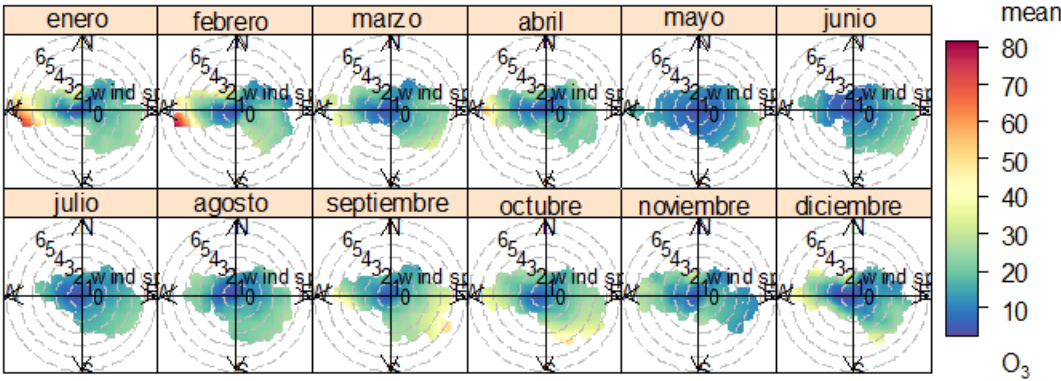
Tunal



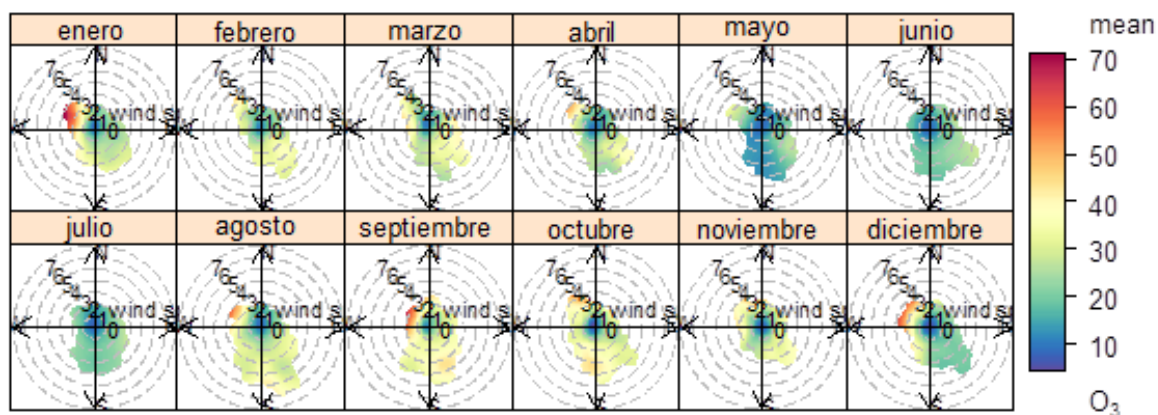
Simón Bolívar



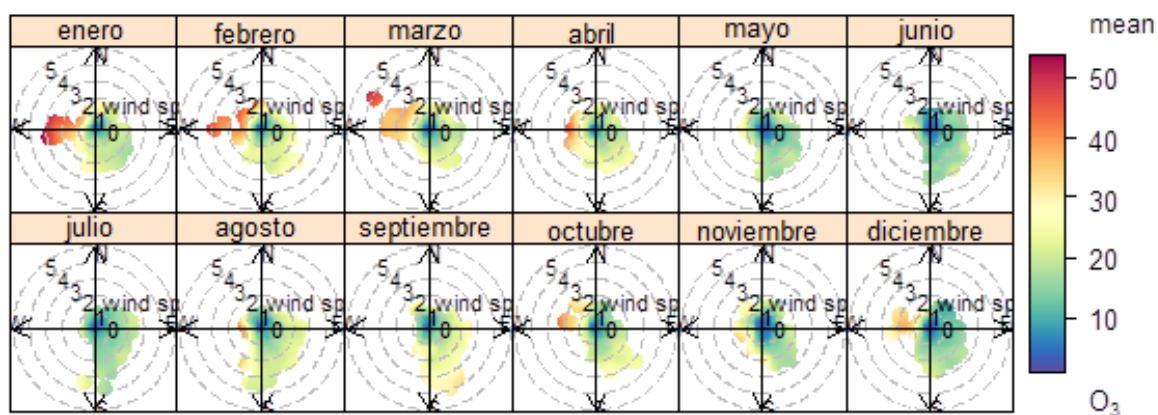
Ferías



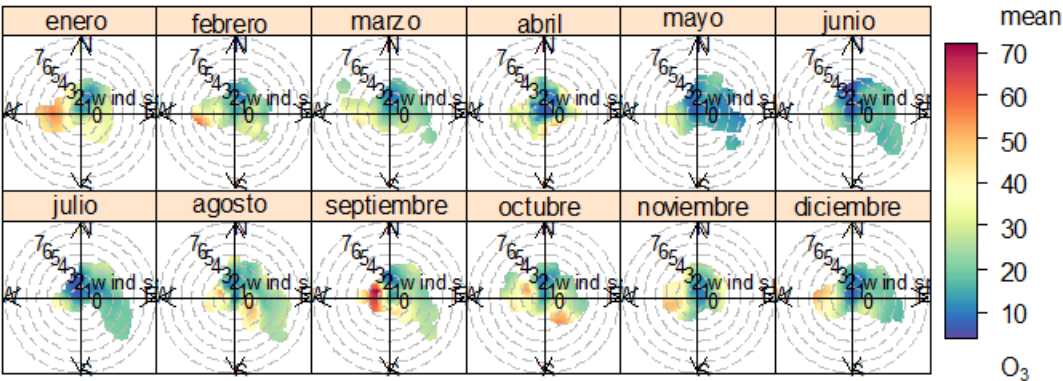
## Usaquen



## Guaymaral

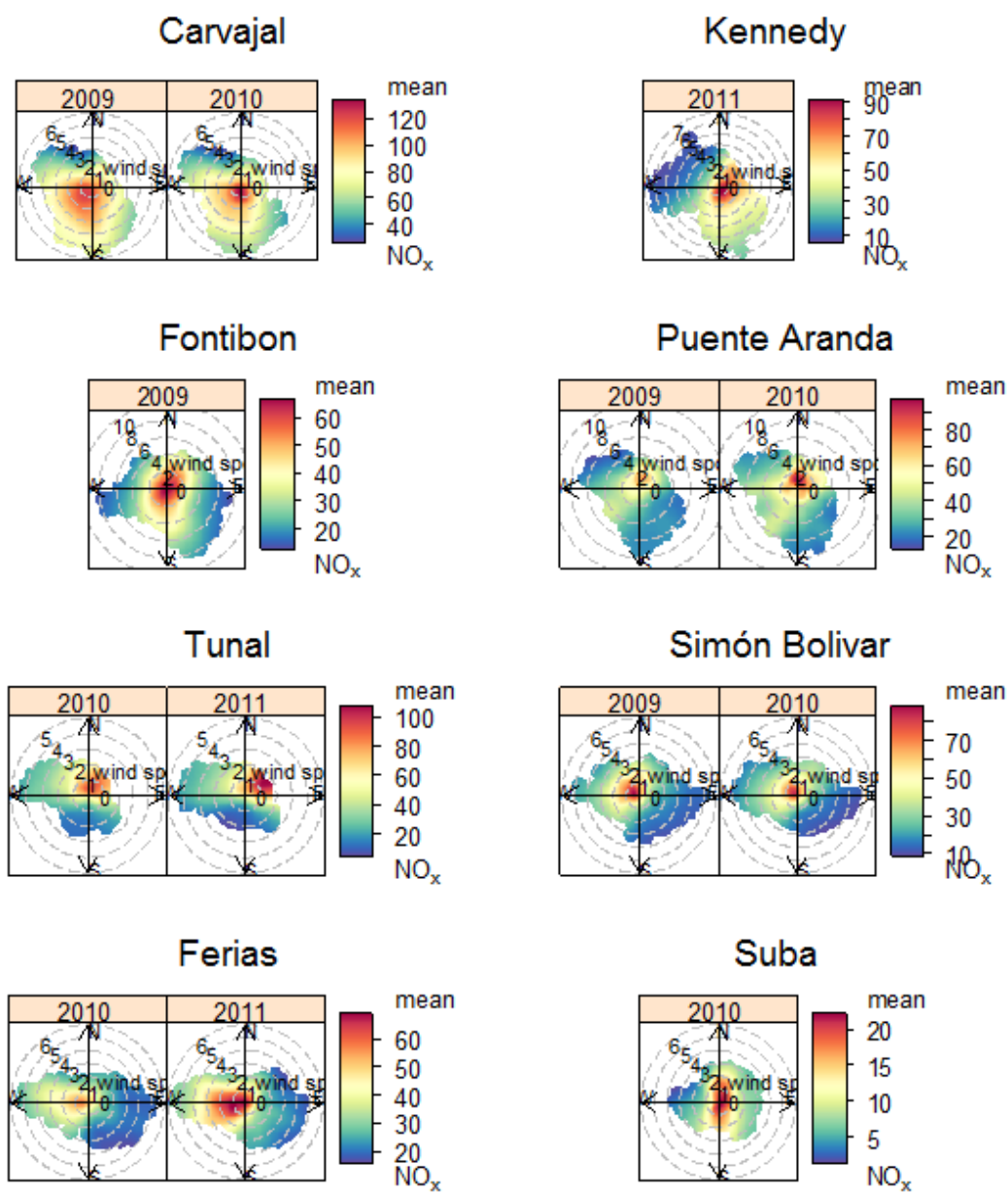


Suba



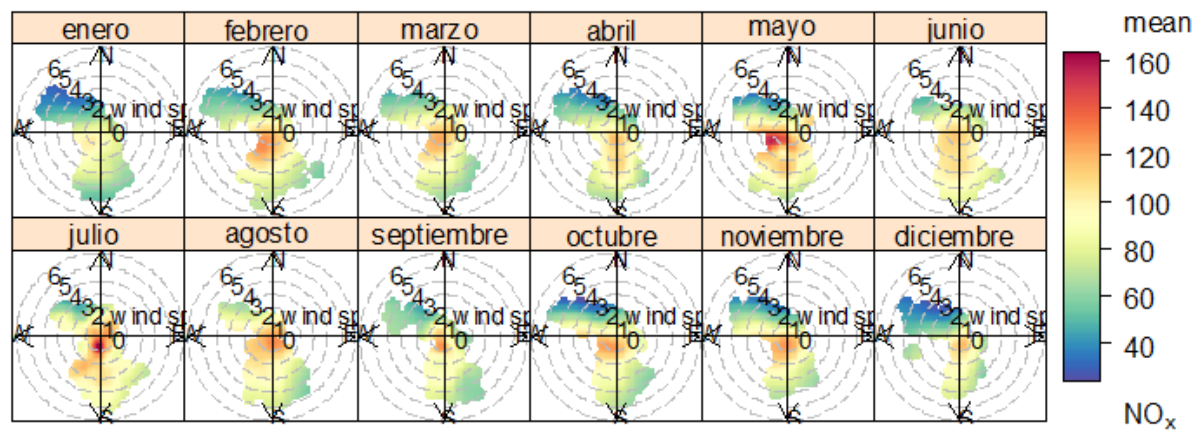


**Anexo E:** Gráfico polar de las concentraciones de  $\text{NO}_x$  estaciones de la RMCAB

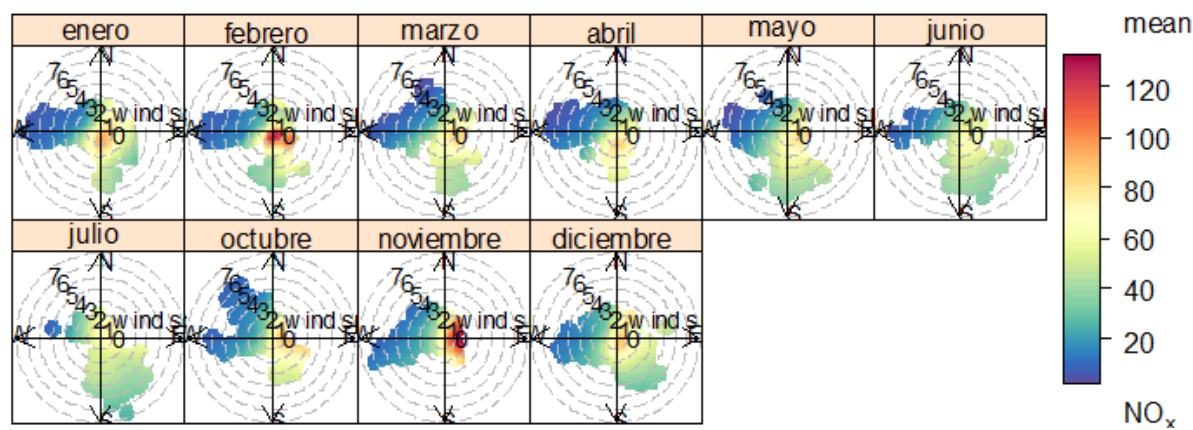




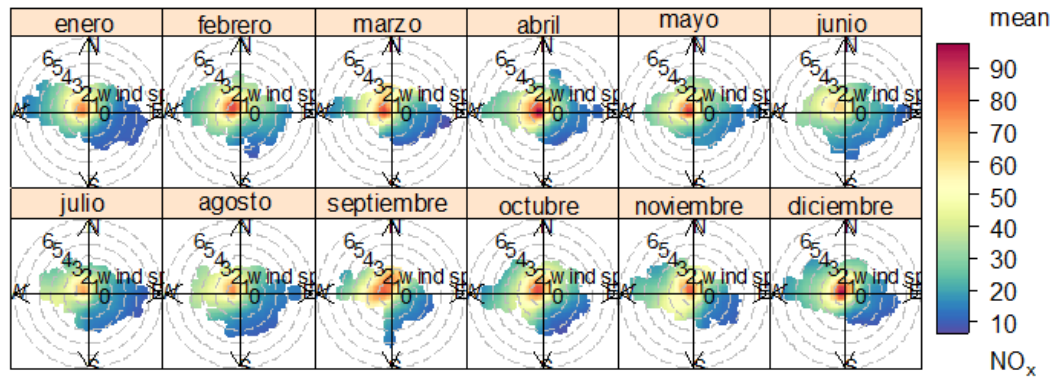
Carvajal



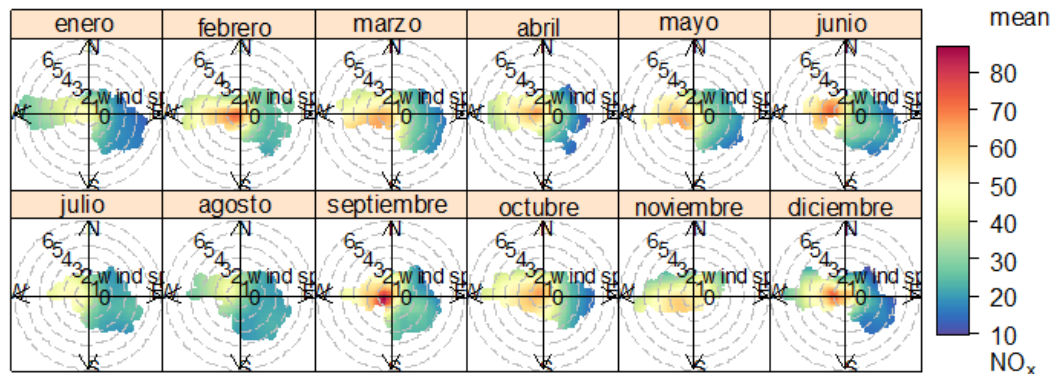
Kennedy



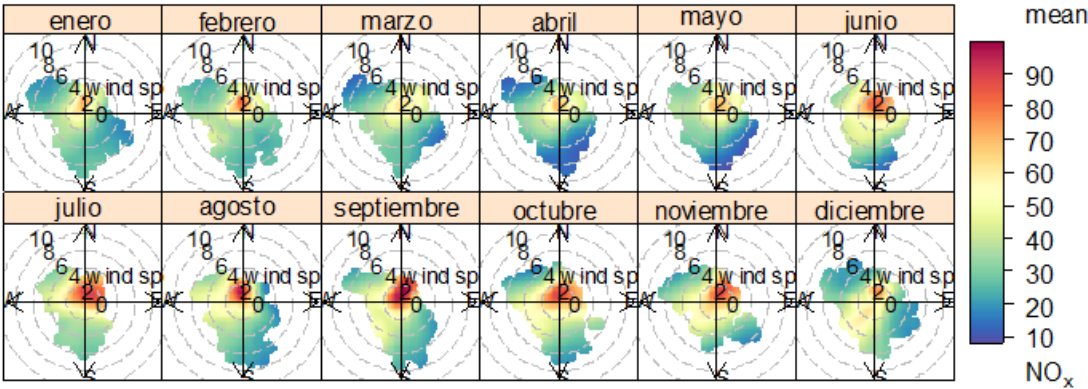
### Simón Bolívar



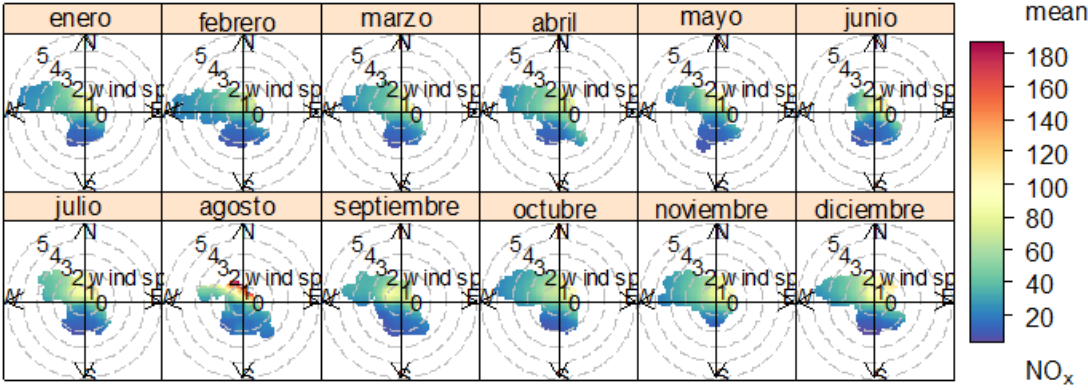
### Ferías



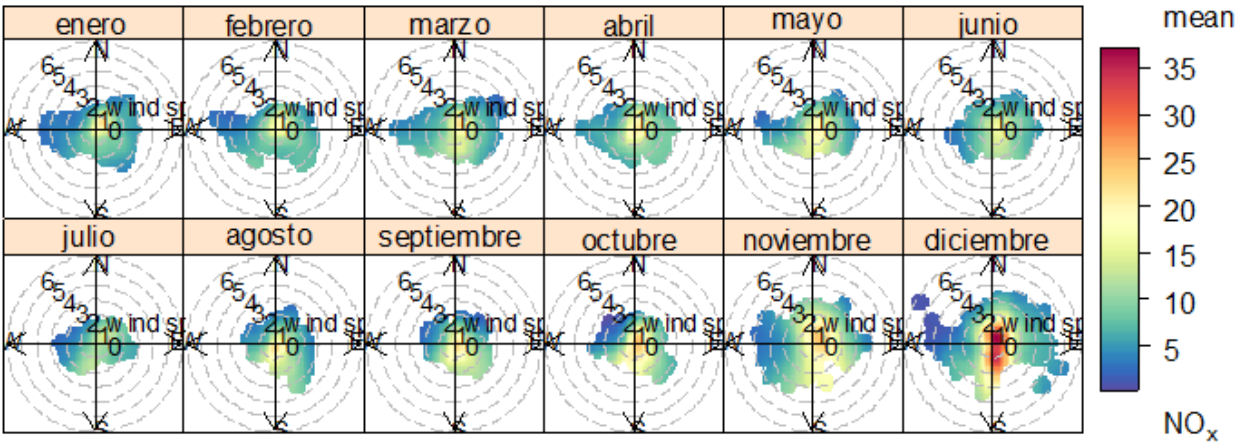
Puente Aranda



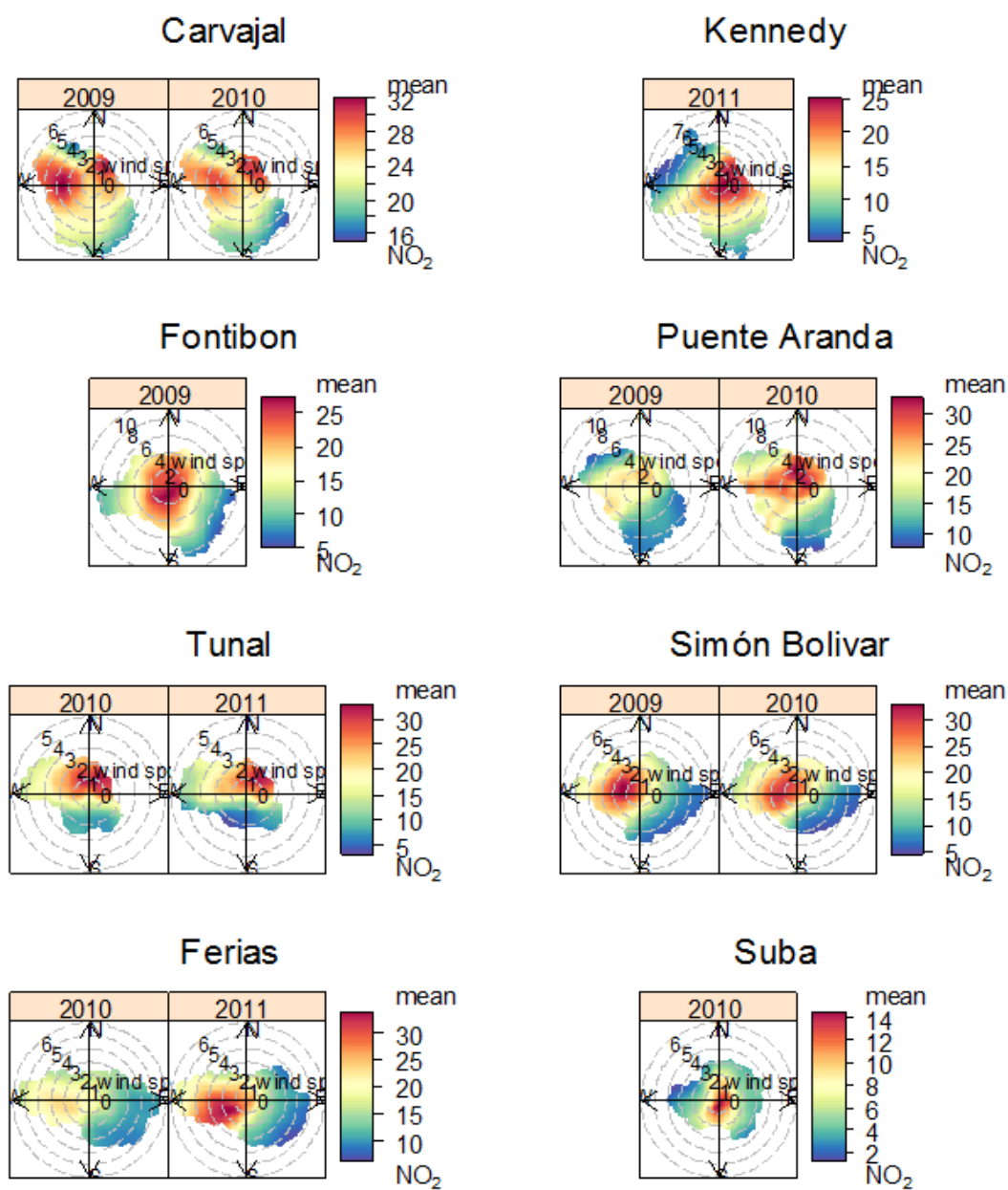
Tunal



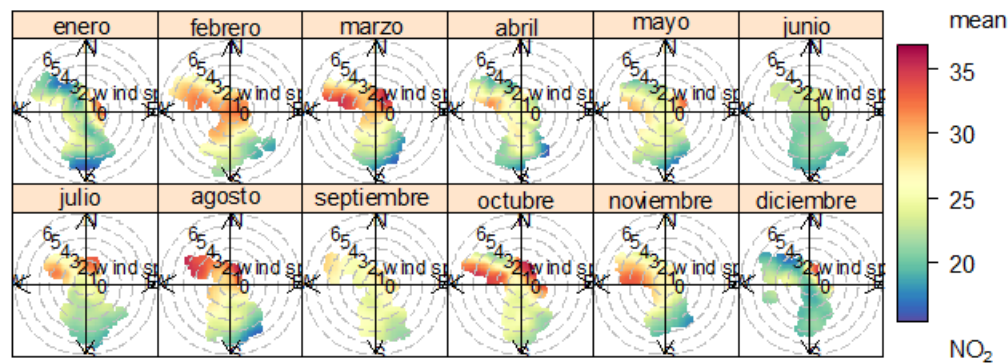
Suba



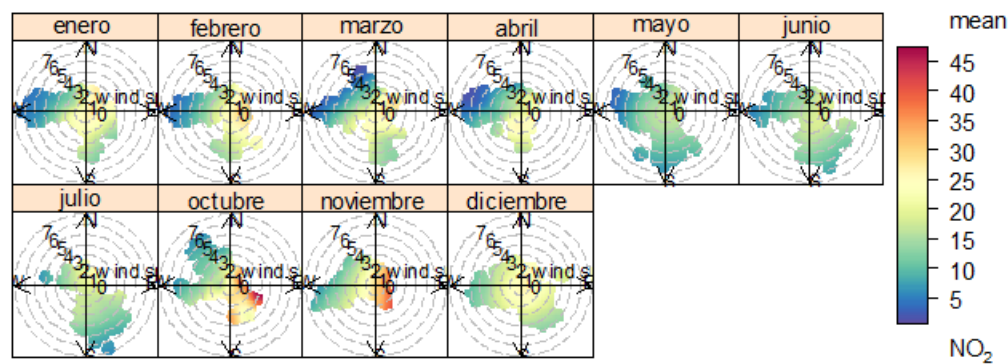
**Anexo F:** Gráfico polar de las concentraciones de NO<sub>2</sub> estaciones de la RMCAB



Carvajal

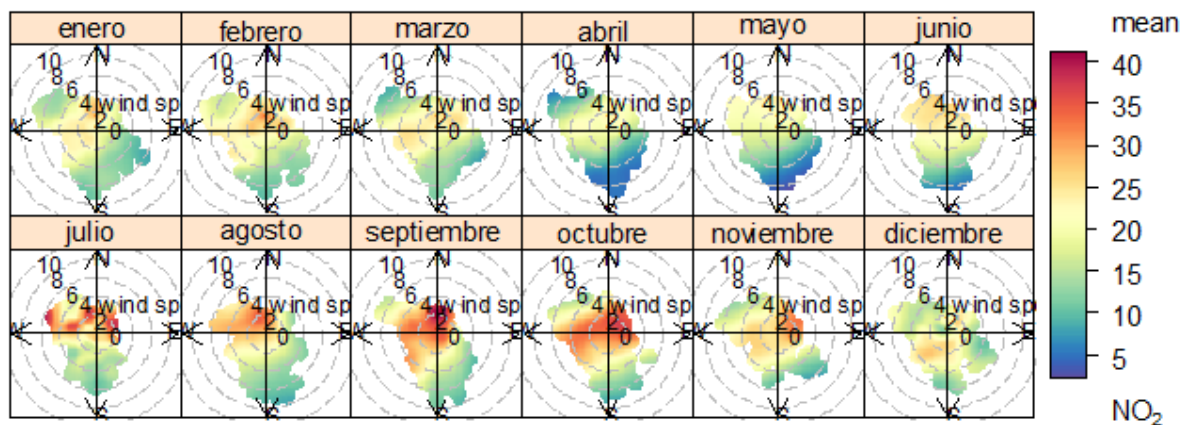


Kennedy

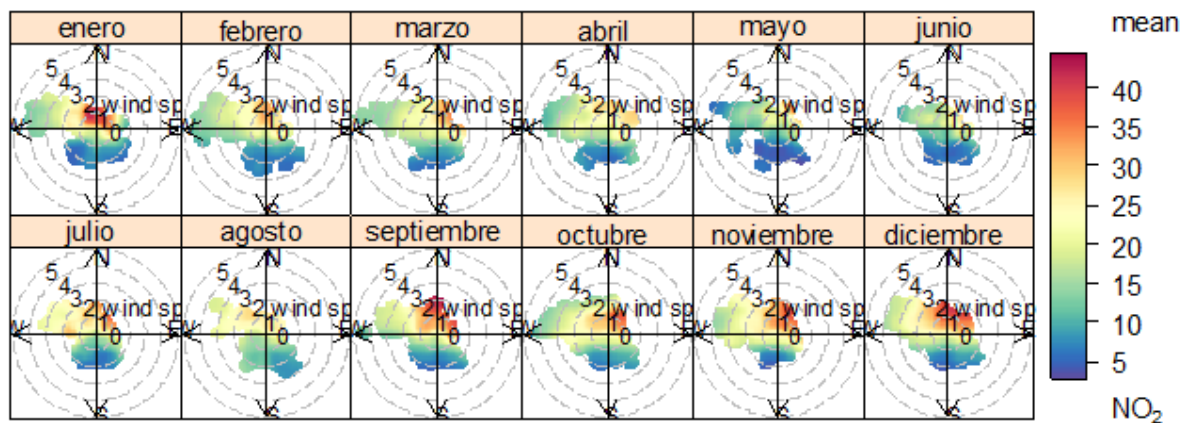




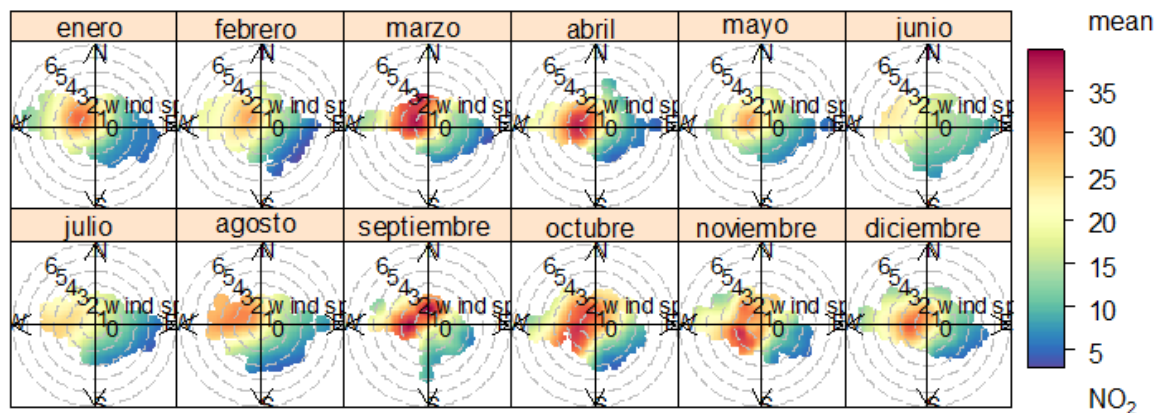
## Puente Aranda



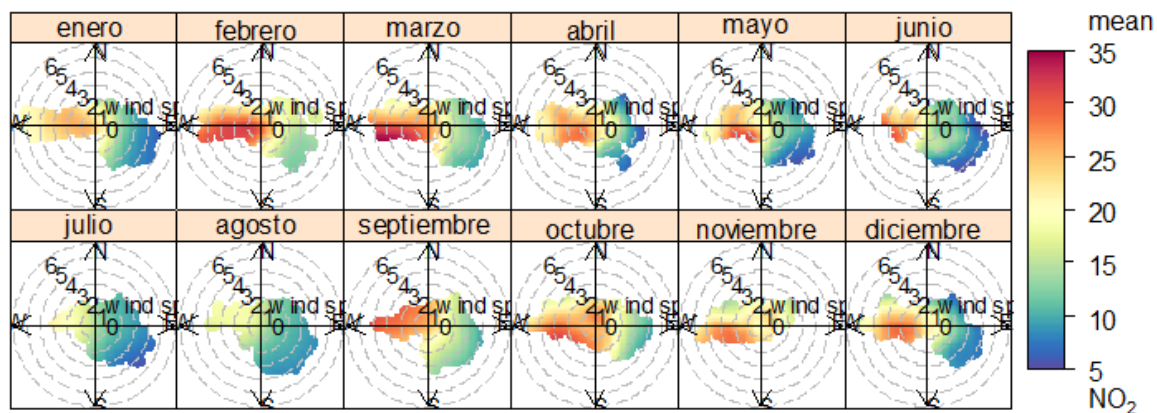
## Tunal



## Simón Bolívar

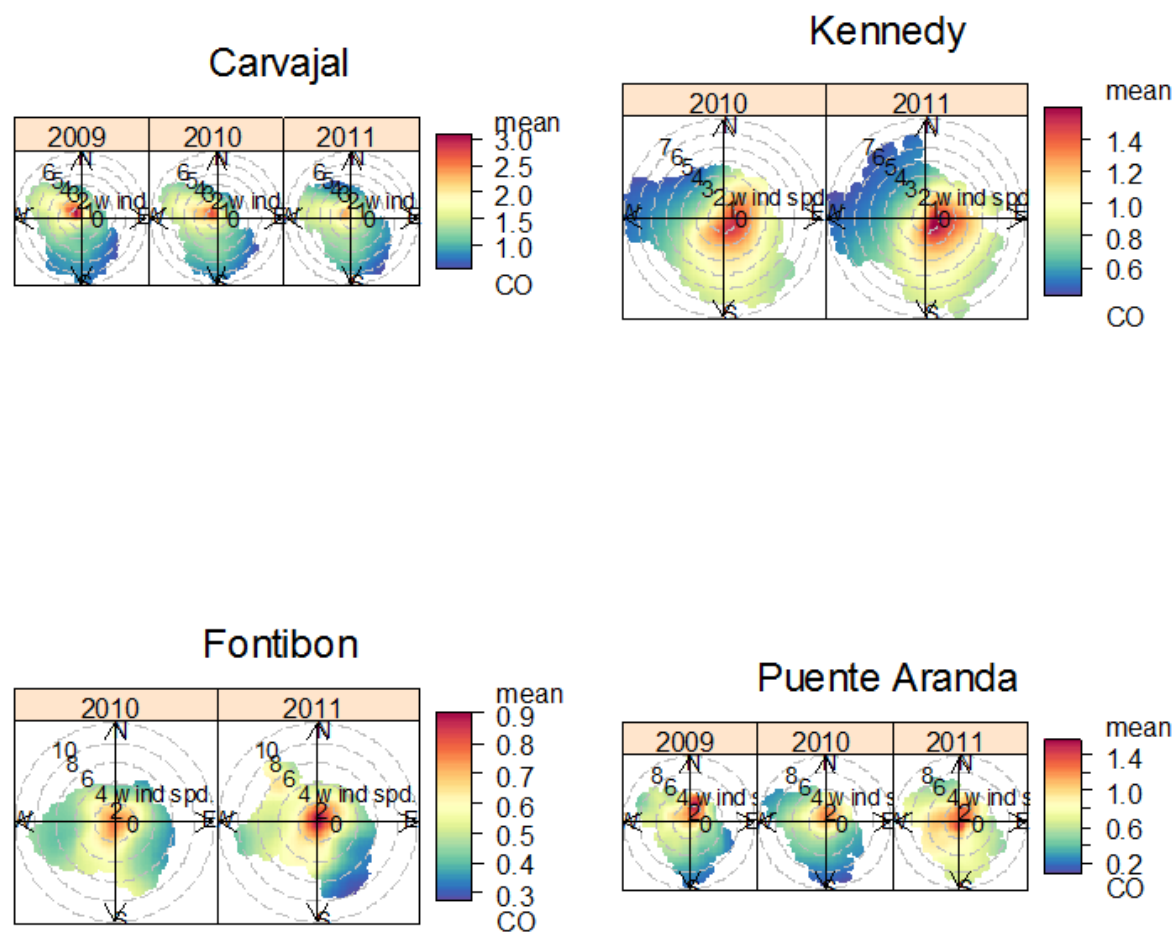


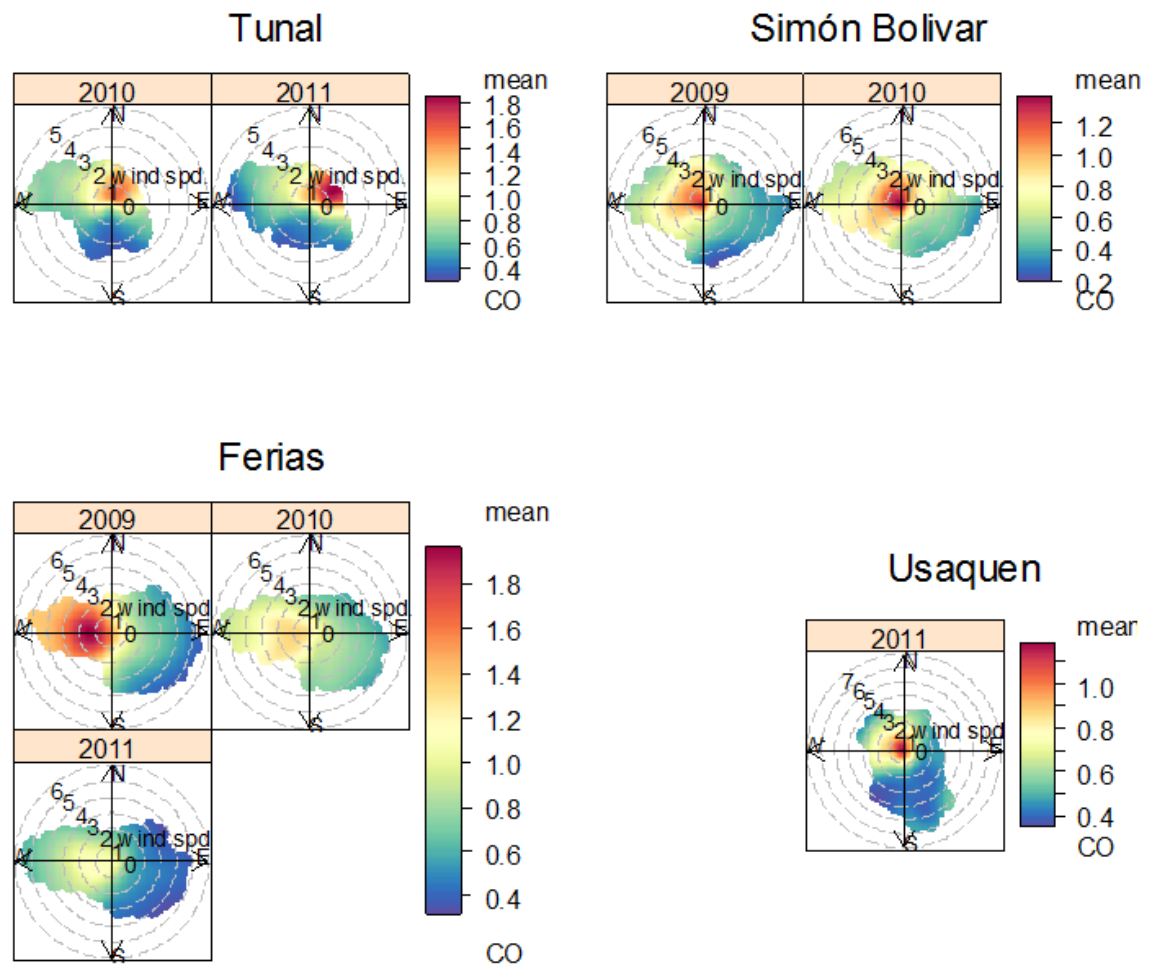
## Ferías



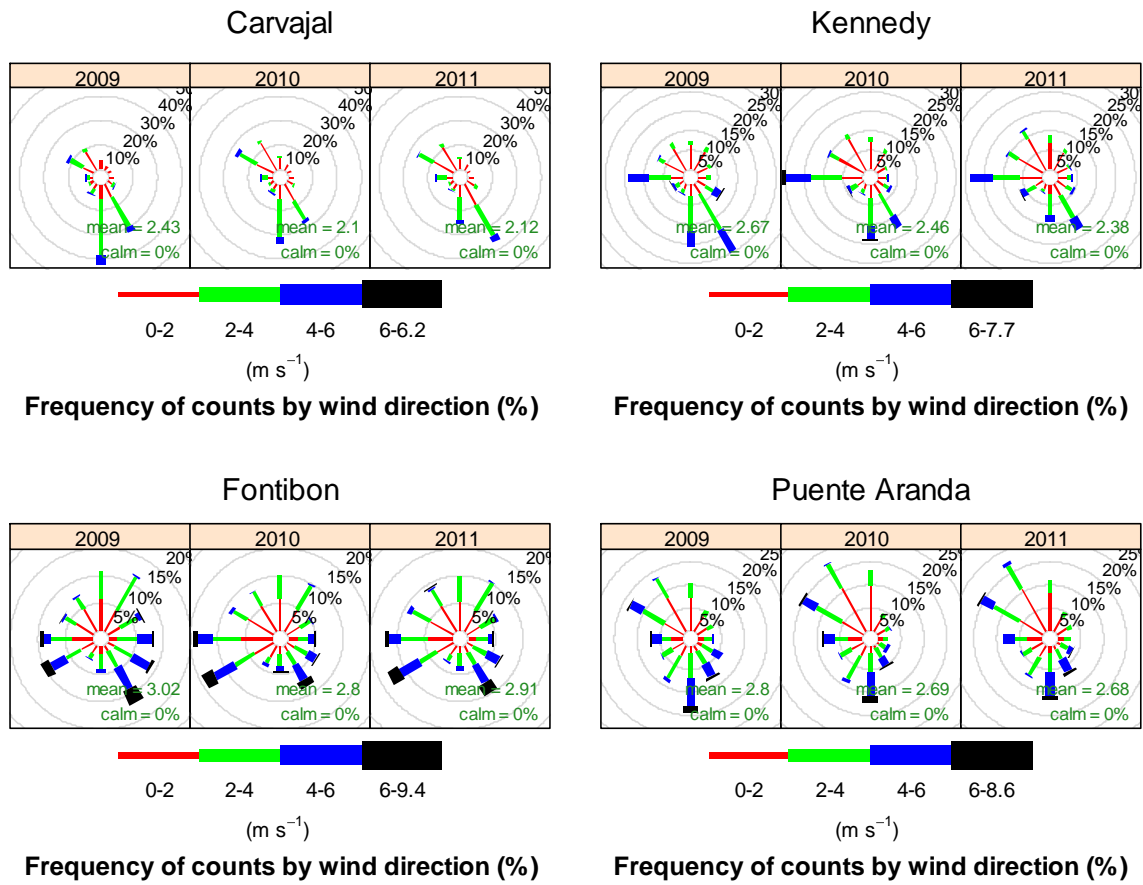


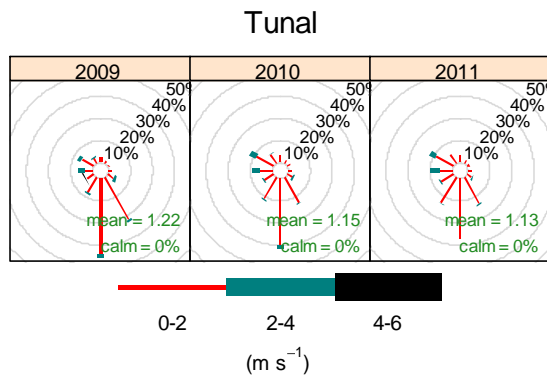
Anexo G: Gráfico polar de las concentraciones de CO estaciones de la RMCAB.



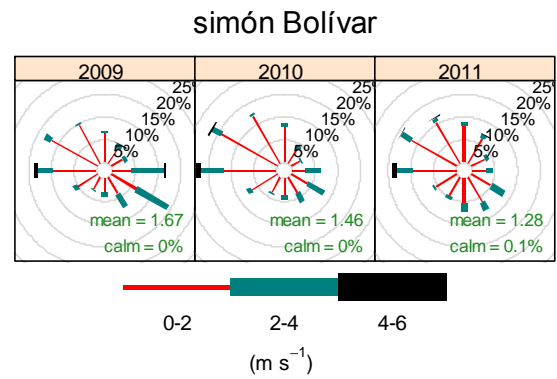


Anexo H. Rosa de los vientos estaciones de la RMCAB

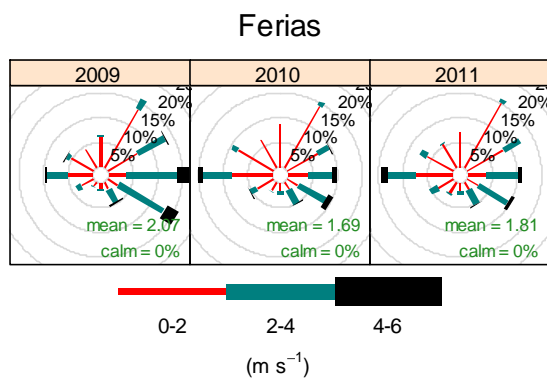




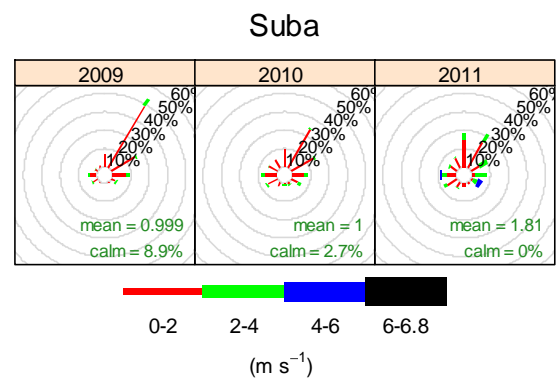
Frequency of counts by wind direction (%)



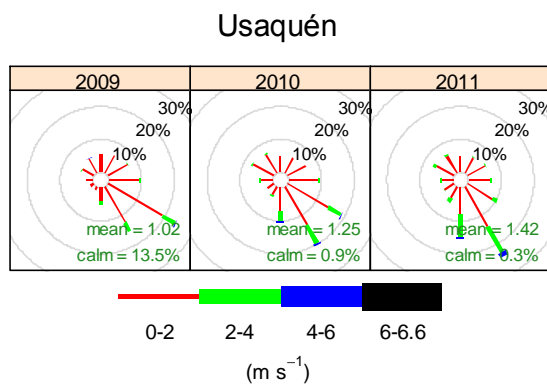
Frequency of counts by wind direction (%)



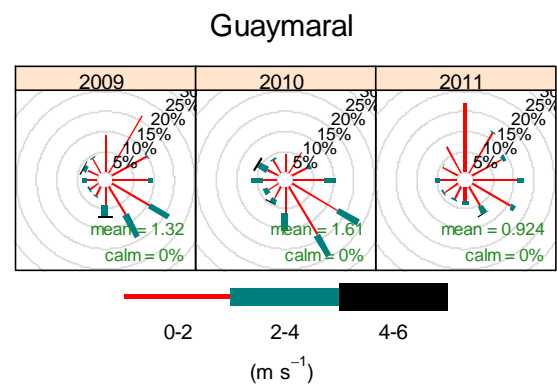
Frequency of counts by wind direction (%)



Frequency of counts by wind direction (%)

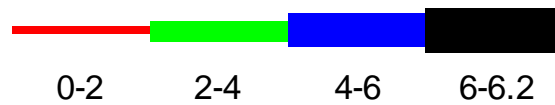
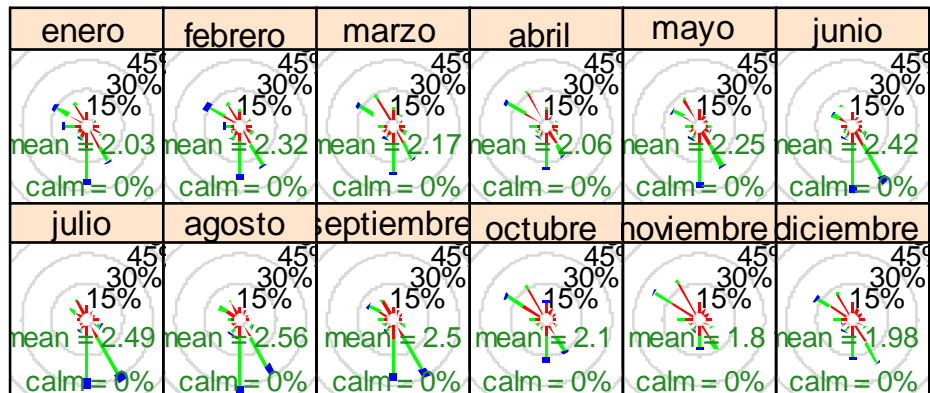


Frequency of counts by wind direction (%)



Frequency of counts by wind direction (%)

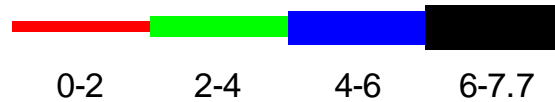
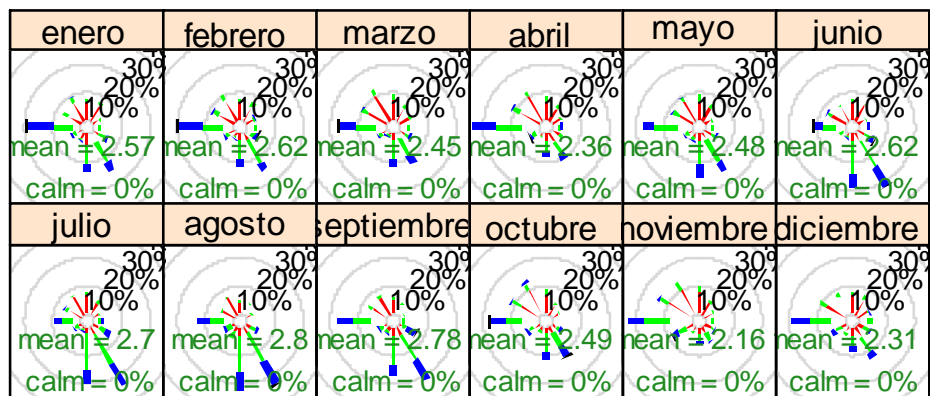
## Carvajal



(m s<sup>-1</sup>)

**Frequency of counts by wind direction (%)**

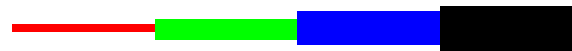
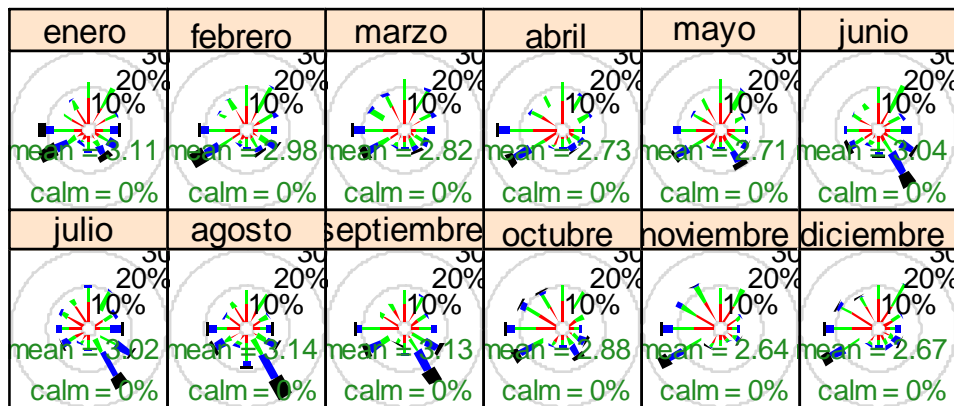
## Kennedy



(m s<sup>-1</sup>)

**Frequency of counts by wind direction (%)**

## Fontibon

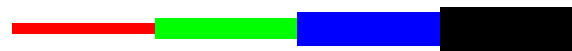
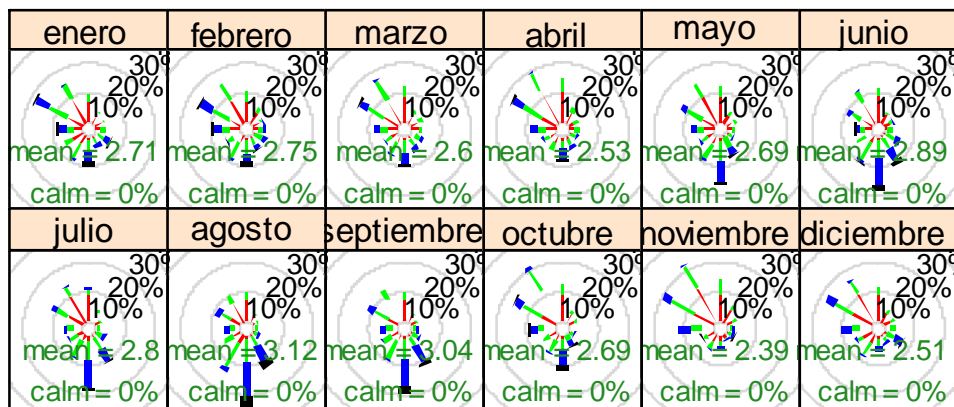


0-2      2-4      4-6      6-9.4

(m s<sup>-1</sup>)

**Frequency of counts by wind direction (%)**

## Puente Aranda

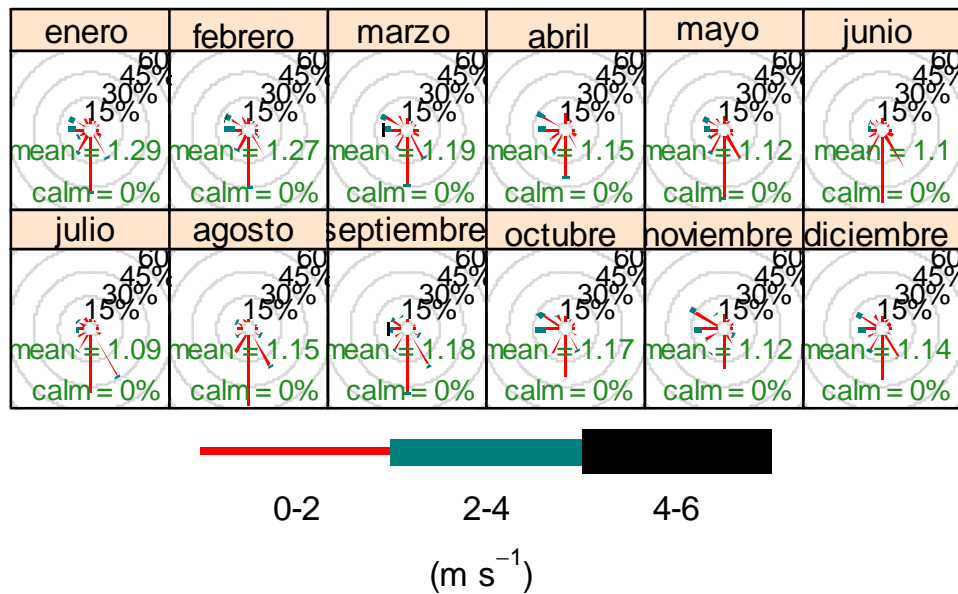


0-2      2-4      4-6      6-8.6

(m s<sup>-1</sup>)

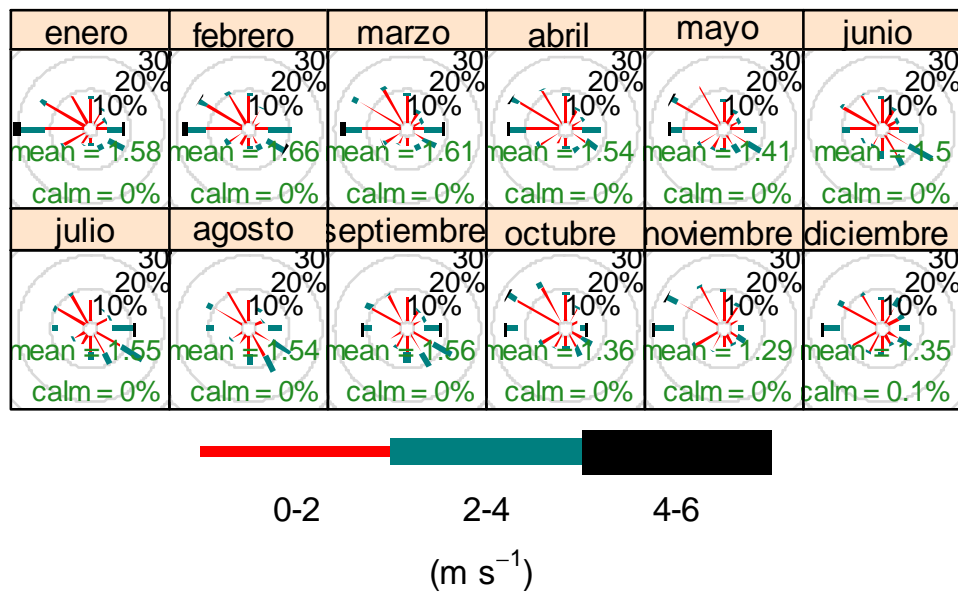
**Frequency of counts by wind direction (%)**

## Tunal



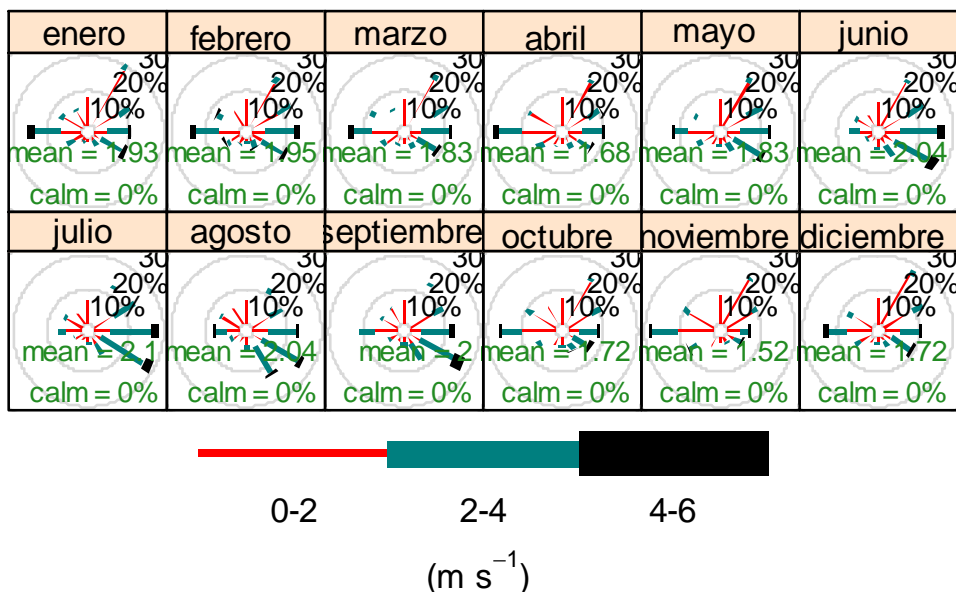
**Frequency of counts by wind direction (%)**

## simón Bolívar



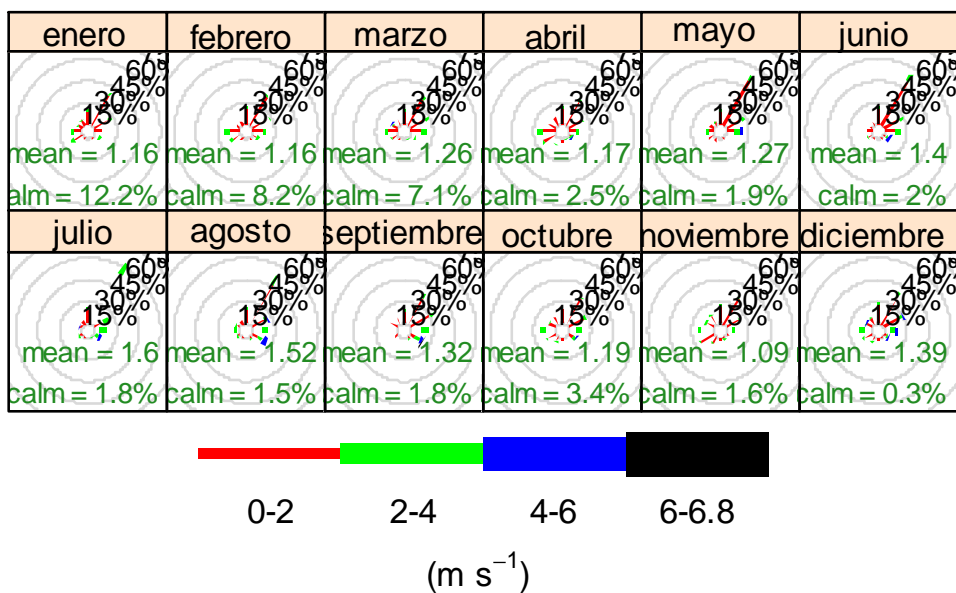
**Frequency of counts by wind direction (%)**

## Ferías



Frequency of counts by wind direction (%)

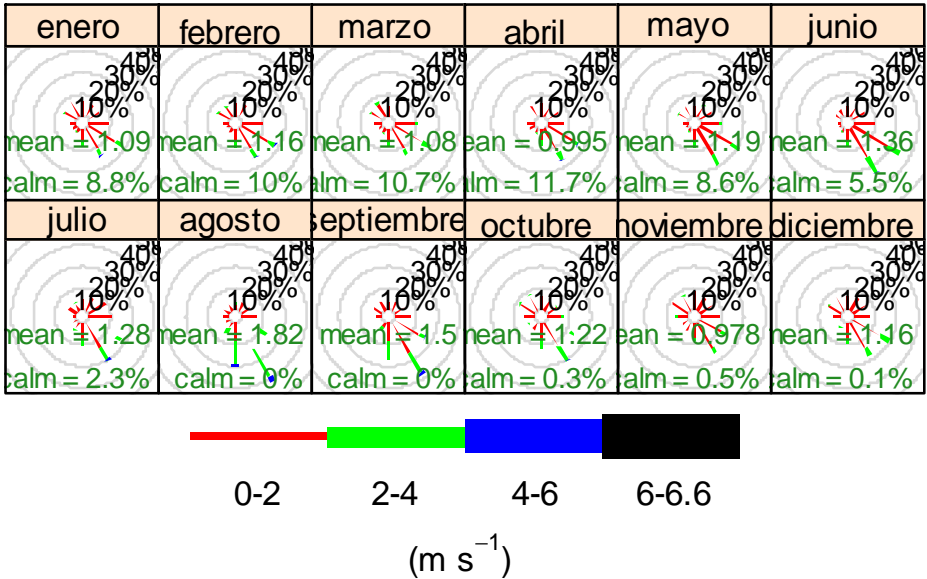
## Suba



Frequency of counts by wind direction (%)

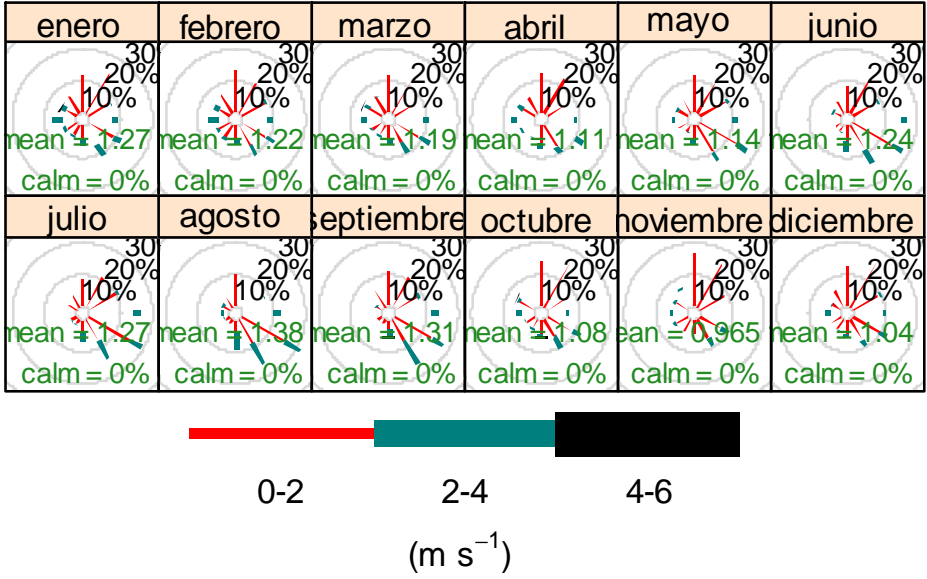


Usaquén



Frequency of counts by wind direction (%)

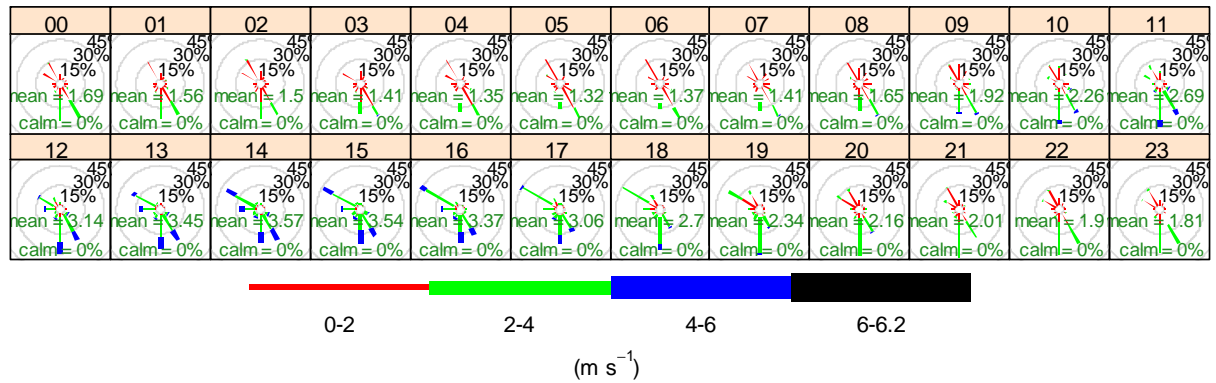
Guaymaral



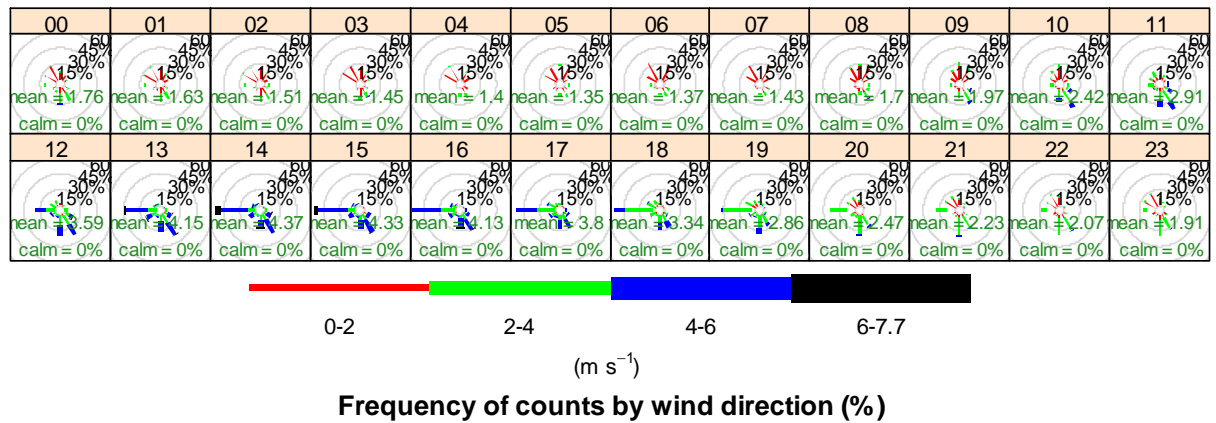
Frequency of counts by wind direction (%)

12

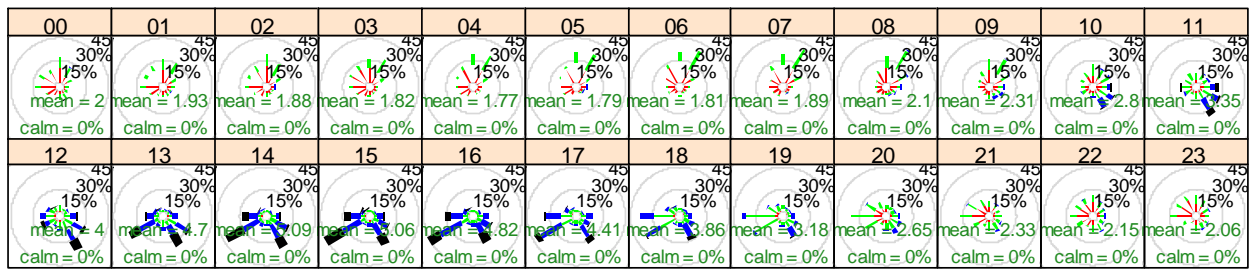
### Carvajal



### Kennedy



### Fontibon

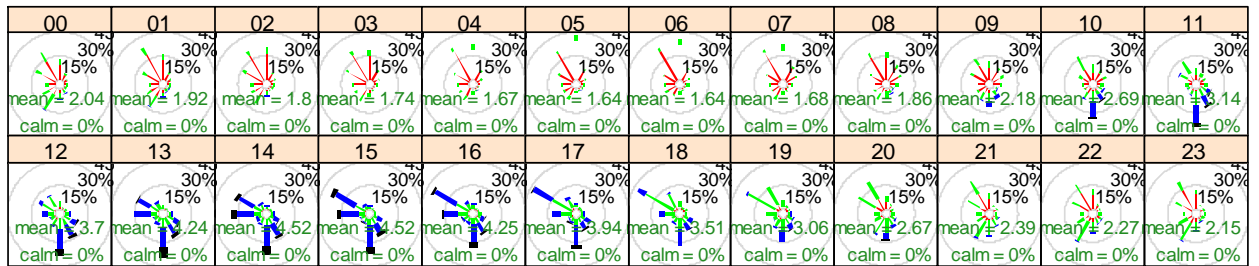


0-2                      2-4                      4-6                      6-9.4

(m s<sup>-1</sup>)

Frequency of counts by wind direction (%)

### Puente Aranda

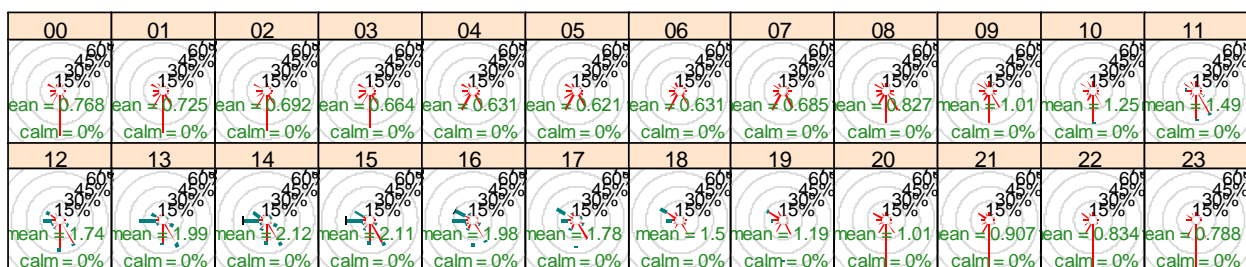


0-2                      2-4                      4-6                      6-8.6

(m s<sup>-1</sup>)

Frequency of counts by wind direction (%)

## Tunal



0-2

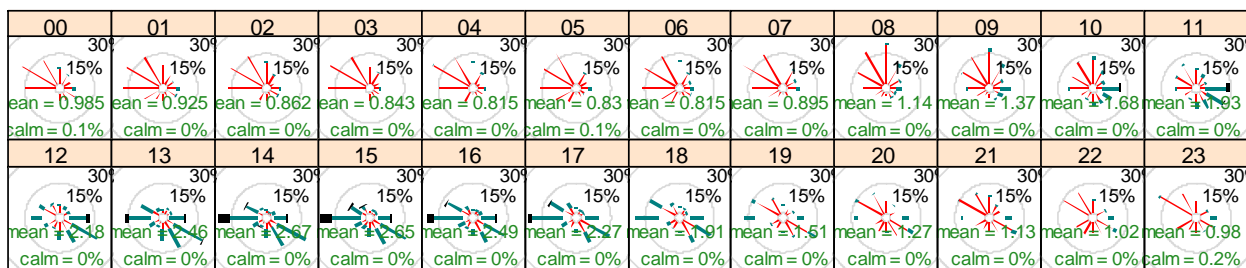
2-4

4-6

(m s<sup>-1</sup>)

Frequency of counts by wind direction (%)

## simón Bolívar



0-2

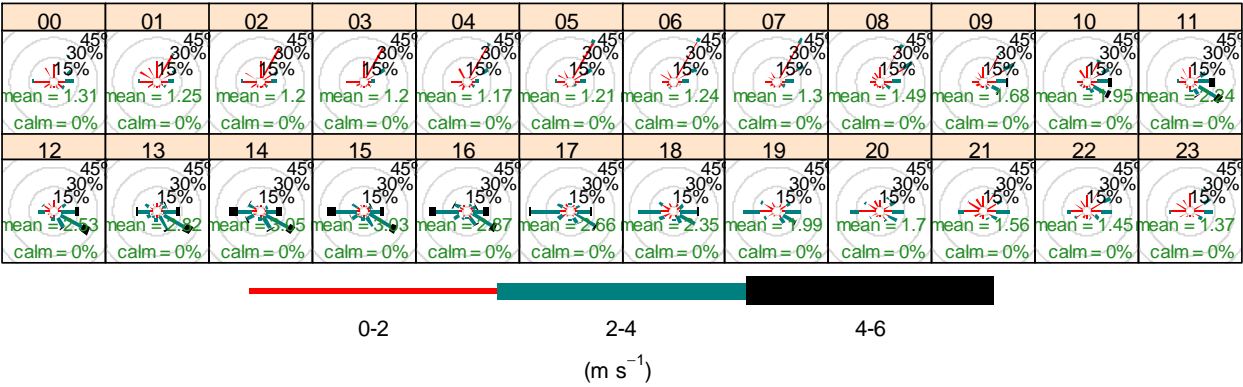
2-4

4-6

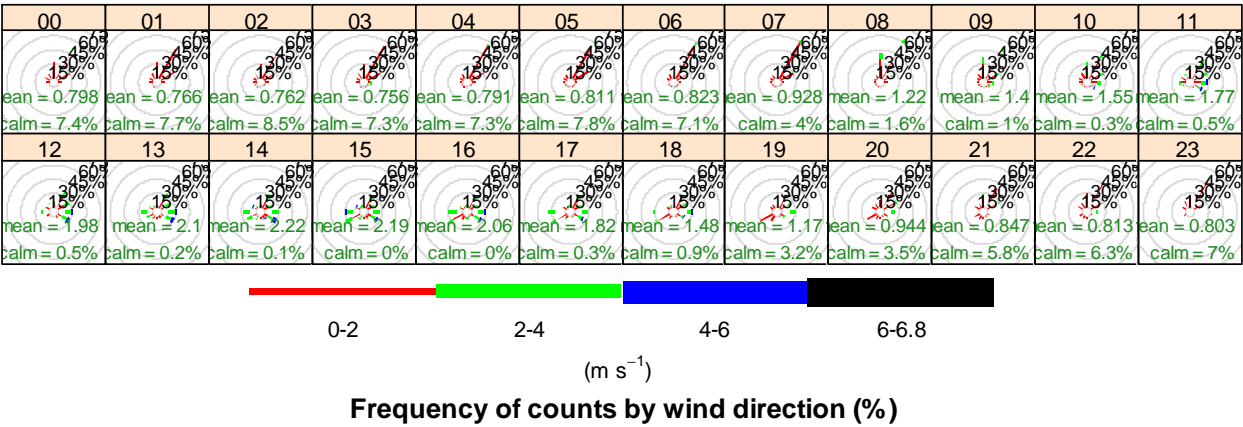
(m s<sup>-1</sup>)

Frequency of counts by wind direction (%)

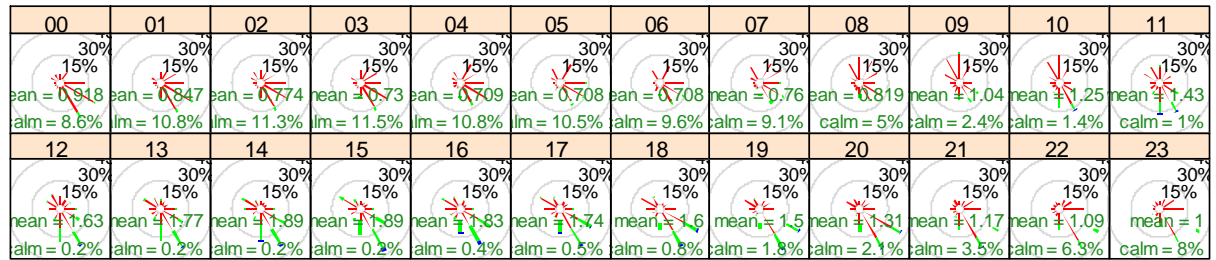
Ferías



Suba



## Usaquén



0-2

2-4

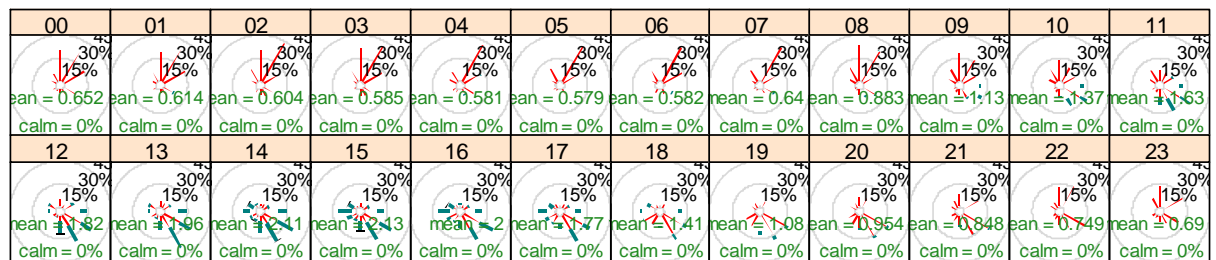
4-6

6-6.6

 $(m s^{-1})$ 

Frequency of counts by wind direction (%)

## Guaymaral



0-2

2-4

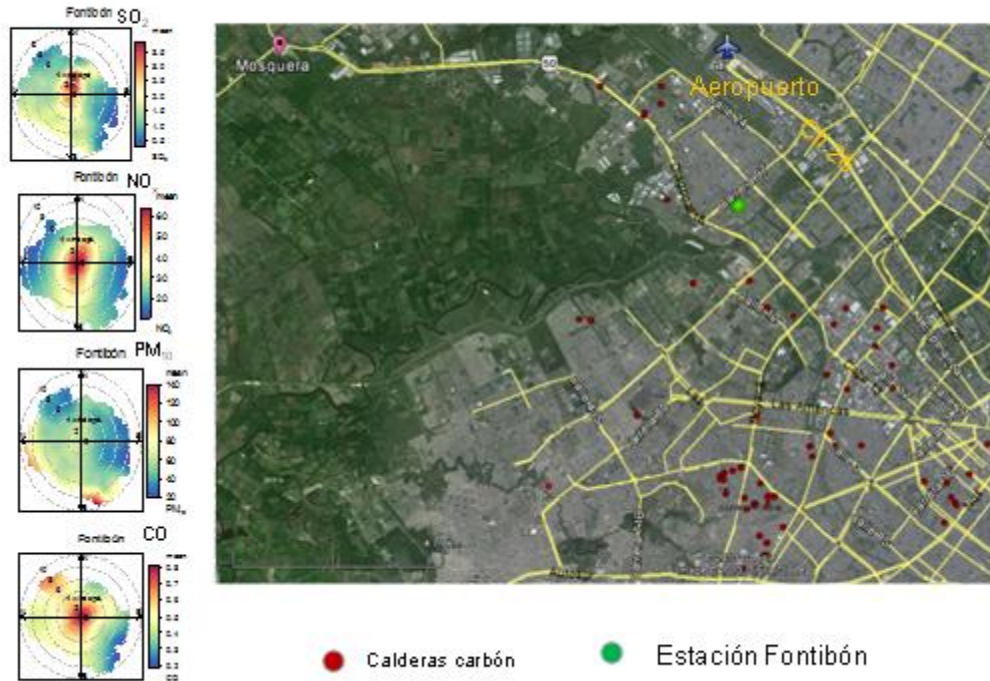
4-6

 $(m s^{-1})$ 

Frequency of counts by wind direction (%)

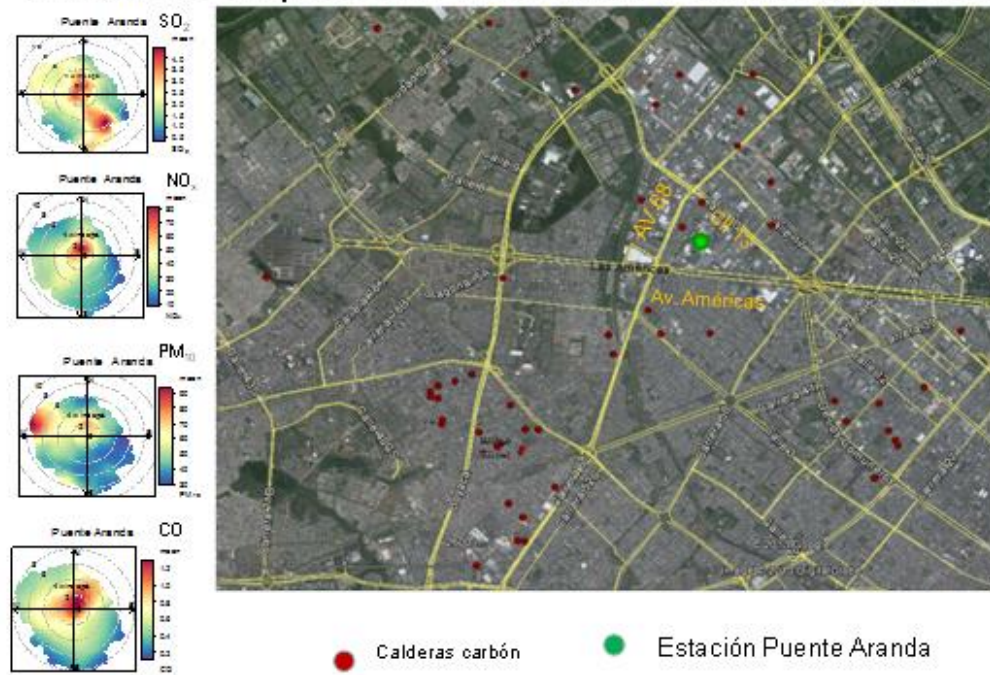
Anexo I. Fotos satelitales de las estaciones de la RMCAB

## Análisis espacial Estación Fontibón





## Análisis espacial Estación Puente Aranda

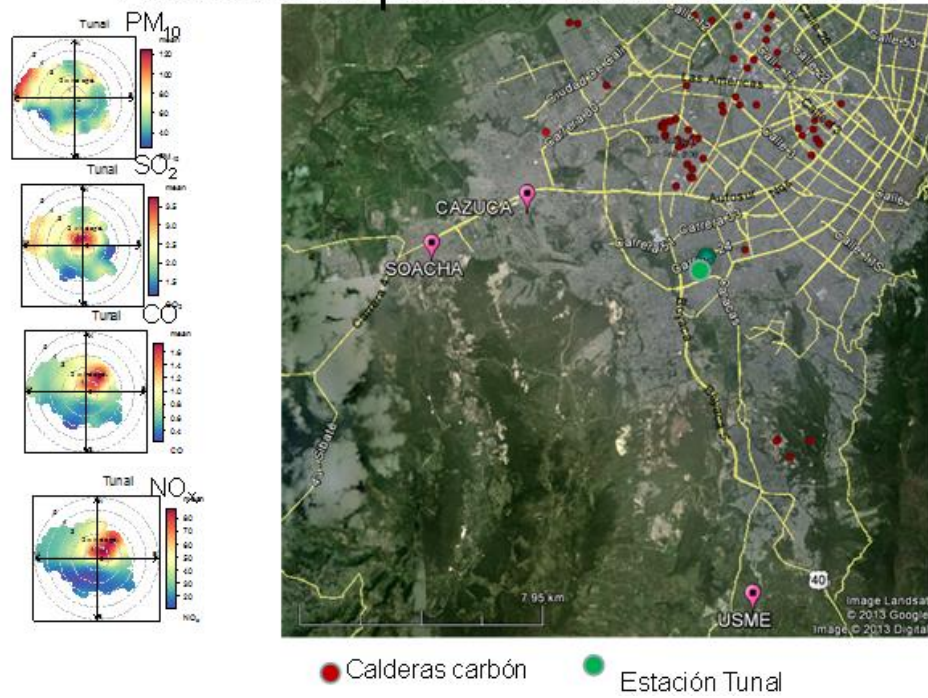




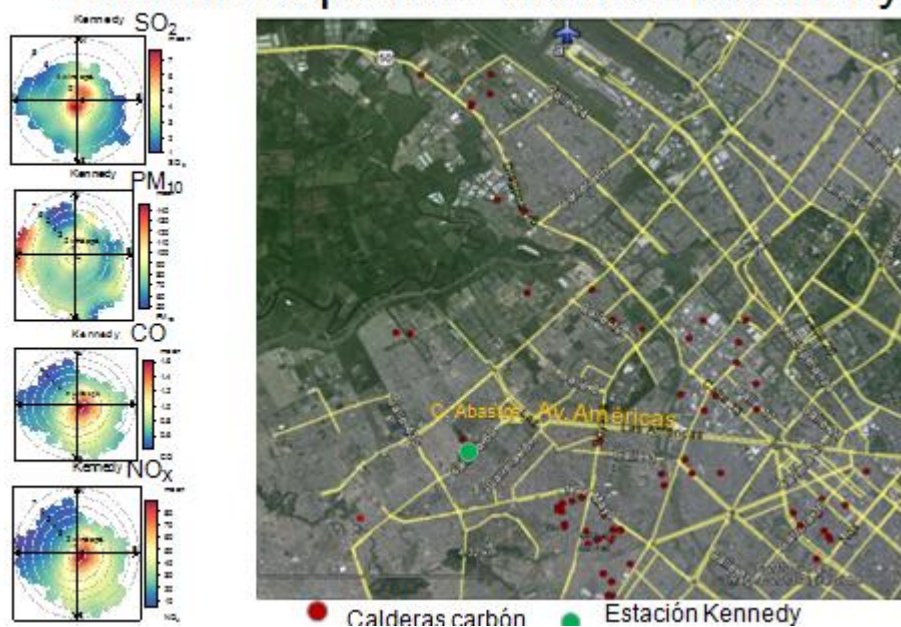
## Análisis espacial Estación Carvajal



## Análisis espacial Estación Tunal



## Análisis espacial Estación Kennedy



<i>Implementación del Software estadístico Openair.....</i>	<i>152</i>
---	------------